

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).

2022 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} 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 2022 年西北太平洋和南海台风业务定位定强、路径和强度预报精度,结果表明:2022 年,官方台风预报机构的定位误差与台风强度等级呈负相关;中国气象局中央气象台在各强度等级的定位平均误差最小,全年定位平均误差(15.4 km)较 2021 年(19.7 km)减小 21.8%,定强平均绝对误差($1.3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)较 2021 年($1.4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)略减小。主观预报和客观预报方法的路径预报平均误差较 2021 年普遍有所减小,而强度预报平均绝对误差较 2021 年普遍有所增大。SSTC、CMA-TRAMS 和 ECMWF-IFS 路径预报技巧评分相对较高。NCEP-GFS、JMA-GSM、CMA-TRAMS 和 CMA-TYM 强度预报系统性偏差不明显,NCEP-GFS、HWRF 和 CMA-TRAMS 强度预报技巧评分相对较高。

关键词: 台风,定位定强误差,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.1000-0526.2024.031404

Verification on Typhoon Forecasts over the Western North Pacific and the South China Sea in 2022

YANG Mengqi^{1,2,3} CHEN Guomin^{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: Operational positioning and intensity estimation errors, as well as track and intensity forecast errors of typhoons over the Western North Pacific and the South China Sea in 2022 are evaluated according to the "Regulations on Typhoon Operations and Services". The results show that in 2022, the positioning errors made by the official typhoon forecasting agencies displayed a negative correlation with the typhoon intensity grades. The mean error of position estimation made by the National Meteorological Centre (NMC), China Meteorological Administration (CMA), were the smallest at each typhoon intensity grade. In 2022, the mean error of position estimation (15.4 km) made by NMC was 21.8% lower than 19.7 km in 2021, and the mean absolute error of intensity estimation ($1.3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$) made by NMC was slightly smaller than the value ($1.4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$) in 2021. Relative to 2021, the mean errors of track forecast by subjective and objective forecasts in 2022 were generally reduced, but the mean absolute errors of intensity

* 国家重点研发计划(2021YFC3000805)、中国气象局创新发展专项(CXFZ2022J027、CXFZ2024J006)和中国气象局重点创新团队(台风团队)(CMA2023ZD06)共同资助

2023 年 12 月 29 日收稿; 2024 年 3 月 29 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

forecasts were generally increased. Track forecast skill scores by SSTC, CMA-TRAMS, and ECMWF-IFS were relatively high. Intensity forecast systematic biases by NCEP-GFS, JMA-GSM, CMA-TRAMS, and CMA-TYM were insignificant, while forecast skill scores by NCEP-GFS, HWRF, and CMA-TRAMS were relatively high.

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

引言

2022年西北太平洋和南海共生成25个热带风暴及以上等级的台风,其中峰值强度为热带风暴级12个,台风级6个,强台风级3个,超强台风级4个。台风活动表现出明显的群发性特征,台风生成位置偏北、偏西,登陆我国的台风数量偏少、强度偏强(钱奇峰等,2023)。

台风是影响我国的主要灾害性天气系统之一。在其活动过程中,常伴随狂风、暴雨、巨浪和风暴潮。台风影响陆地期间,虽有解除部分地区干旱的作用,但也会造成巨大损失(中国气象局,2022),提高台风预报准确率是减轻台风灾害的关键(许映龙等,2010;端义宏等,2022)。预报评估是使用好数值预报产品的基础和首要工作(李泽椿等,2020),是改进模式能力、提升模式产品可靠性的重要依据,也可为预报员、专业机构或用户选择客观产品提供重要参考(潘留杰等,2014;漆梁波,2015;陈笑等,2018)。钱奇峰和毛冬艳(2023)发现2010—2019年欧洲中期天气预报中心全球集合预报系统(ECMWF-EPs)的路径预报精度优于美国国家环境研究中心全球集合预报系统(NCEP-GEFS)。郭蓉等(2019)基于2012—2014年台风预报精度评定,选定了6家数值预报模式作为西北太平洋台风路径多模式集成预报方法的初始成员,12~48 h路径预报的精度较ECMWF有明显改进。王晴等(2022)归纳了中央气象台2012—2021年台风路径预报大误差来源的4种类型台风,发现转向变性型台风变性后的移速倾向于被低估;双台风型台风整体表现为预报偏左、偏慢;弱引导气流型台风引导气流弱且方向多变,导致移向误差大;异常型台风的移向误差大。

由于可供台风业务预报参考的主观和客观预报方法众多,为客观地评定台风业务预报方法性能,1988年起上海台风研究所受委托对全国的台风业务定位定强及路径和强度预报精度进行年度评定

(雷小途,2021)。在历年年度评定(陈国民等,2021;2022;杨梦琪等,2023)的基础上,本文对2022年西北太平洋和南海海域25个台风的业务定位定强精度,以及路径和强度预报精度进行评定,以期帮助业务和科研人员较为系统地认识2022年各台风业务预报方法的预报性能。

1 资料与方法

1.1 资料

本文所用的台风最佳路径数据由中国气象局上海台风研究所整编(<https://tcdata.typhoon.org.cn/zjljsjj.html>),该数据集包含西北太平洋(含南海、赤道以北、180°E以西)台风逐6 h的位置和强度数据。2018年起,对于登陆我国的台风,在其登陆我国前24 h及在我国陆地活动期间,最佳路径时间频次加密为逐3 h一次(Ying et al, 2014; Lu et al, 2021)。

参加评定的各业务预报方法的数据取自实时业务资料库。本文对2022年国内外5个官方台风预报机构发布的实时主观台风中心位置和强度进行定位定强精度评定。此外,还对5个官方台风预报机构的主观路径和强度预报、5个全球模式、4个区域模式、1个集成预报方法的确定性路径和强度预报,以及6个集合预报系统的路径预报进行精度评定,参评的主观预报和客观预报方法详见表1。

1.2 评定方法

台风预报精度评定参照《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

台风定位定强是台风预报的基础,其精度不仅

表 1 参评的主观预报和客观预报方法一览表

方法名称	台风预报机构或全称	缩写	参考文献	
主观预报	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		
客	中国气象局全球同化预报系统	CMA-GFS	沈学顺等,2021;瞿安祥等,2022	
	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	Haiden et al,2021;Magnusson et al,2021	
	英国数值	UKMO-MetUM	Heming,2016;Short and Petch,2018	
	日本数值	JMA-GSM	Yonehara,2021	
观	上海台风模式	SHTM	Li et al,2019	
	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	
预	集成	西北太平洋台风路径多模式集成预报方法	SSTC	郭蓉等,2019
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;Magnusson et al,2021	
	日本气象厅全球集合预报系统	JMA-GEPS	Yamaguchi et al,2022	
	美国国家环境研究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	

影响台风路径和强度预报精度,也会影响台风带来的狂风、暴雨、风暴潮的预报精度(钱传海等,2012;余贞寿等,2020)。

表 2 是以最佳路径数据作为参考,计算得到的 2022 年 5 个官方台风预报机构(表 1)全年定位平均误差和定强平均绝对误差(MAE)。结果表明:5 个官方台风预报机构定位误差总体平均为 22.3 km,相比 2021 年(24.7 km)改进 9.7%,除 JTWC 定位平均误差较 2021 年略微增大外,其他机构定位精度有所提高。CMA 定位平均误差(15.4 km)较 2021 年(19.7 km)(杨梦琪等,2023)减小 21.8%。进一步以 127°E 为分界线,CMA 127°E 以西的定位平均误差(12.0 km,191 次)比 127°E 以东的定位平均误

差(18.6 km,193 次)小 6.6 km。2022 年定强 MAE 总体平均($2.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)相比 2021 年($2.6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)减小 $0.4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。CMA 定强 MAE($1.3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)较 2021 年($1.4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)略减小。同样本比较表明:CMA 定位平均误差(14.4 km)和定强 MAE($1.4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)最小,定位平均误差相比 JMA、JTWC、KMA 和 HKO 分别提高了 37.4%、41.7%、27.6%、37.1%。

将最佳路径台风强度按照热带风暴(TS)、强热带风暴(STS)、台风(TY)、强台风(STY)、超强台风(SuperTY)等级进行分类,2022 年 CMA 在各强度等级的定位平均误差分别为 22.8 km(TS,158 次)、15.6 km(STS,75 次)、11.3 km(TY,76 次)、5.5 km

表 2 2022 年官方台风预报机构对 25 个台风的定位平均误差和定强平均绝对误差
Table 2 Mean of errors position estimation and mean absolute errors of intensity estimation of 25 typhoons by official typhoon forecasting agencies in 2022

样本类型	统计项	CMA	JMA	JTWC	KMA	HKO	总体
非同样本	定位次数/次	385	366	339	312	315	1717
	定位平均误差/km	15.4	25.1	24.6	22.8	24.4	22.3
	定强次数/次	385	366	339	312	312	1714
	定强平均绝对误差/ $(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	1.3	2.4	2.9	2.8	1.9	2.2
同样本	定位定强次数/次	234	234	234	234	234	1170
	定位平均误差/km	14.4	23.0	24.7	19.9	22.9	21.0
	定强平均绝对误差/ $(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	1.4	2.6	3.1	3.0	1.9	2.4

(STY, 48 次)、1.5 km (SuperTY, 28 次)。图 1 为各个官方台风预报机构在不同强度等级的同样本定位平均误差,结果表明:官方台风预报机构的定位误差与台风强度等级呈负相关,CMA 在各强度等级的定位平均误差最小。

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 2022 年主观预报和客观预报方法各预报时效的路径预报非同样本平均误差。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 72.7~83.8、133.3~148.4、178.5~216.3、214.1~257.1 和 290.7~362.9 km,且较 2021 年普遍有所减小,24、48、72 h 路径预报平均误差比 2021 年分别减小了 5~15、5~25、15~40 km 不等。

客观预报相比主观预报存在时间滞后,主观预报通常参考 12 h 之前起报的客观预报,所以 24、48、72、96 和 120 h 主观预报大体参考 36、60、84、108 和 132 h 客观预报。全球模式路径预报性能差异较大,36、60、84、108 和 132 h 路径预报平均误差区间分别为 85.2~124.1、147.8~193.5、197.9~271.6、

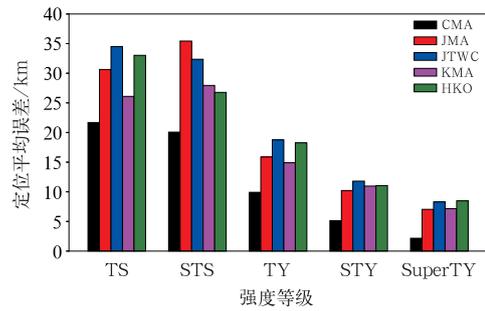


图 1 2022 年官方台风预报机构不同强度等级的定位平均误差

Fig. 1 Mean errors of position estimation at each intensity grade by official typhoon forecasting agencies in 2022

254.5~398.7、385.5~688.5 km。4 个区域模式 36 h 和 60 h 路径预报平均误差区间分别为 75.2~126.3 km、137.4~211.9 km。

2022 年,SSTC 各预报时效(12~120 h)的路径预报平均误差相对较小,其 36、60、84 和 108 h 路径预报平均误差分别为 82.7、133.5、176.8、232.9 km(表 3)。SSTC 路径预报的表现得益于集成成员的选定,12~72 h 涵盖 6 个初始成员,分别为 CMA-TRAMS、SHTM、ECMWF-IFS、NCEP-GFS、JMA-GSM、UKMO-MetUM,78~120 h 涵盖 3 个初始成员,分别为 ECMWF-IFS、NCEP-GFS、UKMO-MetUM。将 SSTC 分别与 5 个全球模式和 4 个域模式进行同

表 3 2022 年各预报方法各预报时效的路径预报平均误差 (单位:km)

Table 3 Mean errors of track forecast (unit: km) by each forecast method at each lead time in 2022

方法名称		预报时效/h											
		12	24	36	48	60	72	84	96	108	120	132	
主观 预报	CMA	51.9(334)	76.5(280)	111.0(238)	148.4(201)	189.3(166)	216.3(135)	—	249.2(85)	—	362.9(56)	—	
	JMA	48.4(261)	72.7(279)	—	133.3(203)	—	198.4(141)	—	217.3(92)	—	290.7(61)	—	
	JTWC	55.6(310)	78.2(272)	105.1(235)	136.9(204)	—	208.0(143)	—	257.1(95)	—	331.3(64)	—	
	KMA	59.8(275)	83.8(237)	115.1(205)	144.1(177)	333.9(5)	215.1(123)	—	244.9(80)	—	352.4(55)	—	
	HKO	—	79.3(232)	—	136.9(174)	—	178.5(123)	—	214.1(86)	—	332.6(57)	—	
客 观 预 报	全球 模式	CMA-GFS	66.6(305)	88.3(260)	124.1(226)	157.7(193)	193.5(163)	236.7(132)	271.6(108)	325.1(85)	374.9(70)	414.9(56)	—
	NCEP-GFS	48.7(250)	67.4(218)	95.7(190)	134.2(169)	164.7(148)	194.0(127)	204.9(108)	230.9(90)	254.5(75)	328.3(63)	385.5(51)	
	ECMWF-IFS	46.3(271)	63.3(234)	85.2(203)	114.8(176)	147.8(151)	179.7(128)	197.9(104)	222.7(45)	275.6(35)	339.6(29)	416.4(23)	
	UKMO-MetUM	49.2(145)	68.6(125)	92.3(106)	132.0(91)	170.9(79)	224.4(67)	248.4(52)	324.6(43)	398.7(34)	544.1(28)	688.5(22)	
	JMA-GSM	49.1(264)	70.5(227)	101.2(192)	138.5(165)	182.1(140)	233.6(115)	260.0(91)	305.4(76)	321.3(60)	397.9(50)	461.9(40)	
	区域 模式	SHTM	55.9(152)	78.7(129)	118.1(108)	164.4(93)	205.5(77)	244.3(61)	—	—	—	—	—
	CMA-TRAMS	42.4(139)	55.3(119)	75.2(103)	104.4(89)	137.4(76)	180.9(62)	—	—	—	—	—	—
	CMA-TYM	53.0(311)	78.9(266)	116.1(231)	159.8(198)	208.6(166)	257.4(133)	306.4(106)	382.9(87)	498.9(72)	689.1(57)	—	—
	HWRF	58.2(222)	83.7(195)	126.3(169)	175.4(150)	211.9(132)	251.5(115)	277.1(99)	315.1(83)	379.1(72)	469.9(60)	—	—
	集成	SSTC	37.0(308)	57.7(268)	82.7(232)	110.7(199)	133.5(167)	158.8(135)	176.8(109)	196.8(87)	232.9(71)	288.4(58)	—

注:括号内为样本数,单位:个;“—”表示该预报方法的台风报文在该预报时效没有预报数据。

样本比较,结果表明:5个全球模式中 ECMWF-IFS 各预报时效(12~120 h)路径预报平均误差普遍最小。SSTC 60 h 及以内路径预报平均误差与 ECMWF-IFS 相当,然而 3 d 及以上路径预报平均误差明显小于 ECMWF-IFS。4个区域模式中 CMA-TRAMS 各预报时效(12~72 h)路径预报平均误差小于其他区域模式,SSTC 60 h 及以内路径预报平均误差与 CMA-TRAMS 相当,72 h 路径预报平均误差小于 CMA-TRAMS。

进一步分析主观、客观路径预报大误差,将预报误差大于 95%分位数的样本作为大误差样本(表略)。5个官方台风预报机构 24、48、72、96 和 120 h 预报误差 95%分位数分别为 163.6~195.0、366.7~423.7、442.9~669.9、461.7~805.9、619.1~790.1 km,其中 CMA 24 h 预报误差 95%分位数最小。全球模式和区域模式中,CMA-TRAMS 各预报时效预报误差 95%分位数最小,24、36、48、60、72 h 分别对应 95.2、114.3、177.4、258.1、310.8 和 403.7 km。主观、客观预报大误差主要由于低估台风移速,如 2218 号台风洛克、2212 号台风梅花。

图 2 展示了官方台风预报机构(图 2a~2c)、全球模式和区域模式(图 2d~2f)近 15 年(2008—2022

年)24、48、72 h 路径预报平均误差演变趋势,由于客观预报是主观预报发布的预报结果的重要参考,主观、客观预报方法历年平均误差变化趋势大体一致。2008—2015 年官方台风预报机构和模式 24、48、72 h 路径预报平均误差持续并快速减小,自 2013 年起官方台风预报机构 24、48、72 h 路径预报平均误差分别向下突破 100、150、250 km 关口。2015 年以来(2015—2022 年)官方台风预报机构和模式路径预报平均误差没有表现出持续减小的趋势,全球模式中 ECMWF-IFS 历年路径预报平均误差普遍较小,区域模式中 CMA-TRAMS 历年路径预报平均误差普遍较小。

3.1.2 技巧评分

2022 年各预报方法相对于气候持续法(中国气象局,2012)的路径预报技巧评分列于表 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 63.2%~71.7%、66.9%~72.4%、70.7%~74.0%。各客观预报方法 24、48 和 72 h 路径预报技巧评分均大于 60%,其中 SSTC、CMA-TRAMS 和 ECMWF-IFS 各预报时效的路径预报技巧评分相对较高。

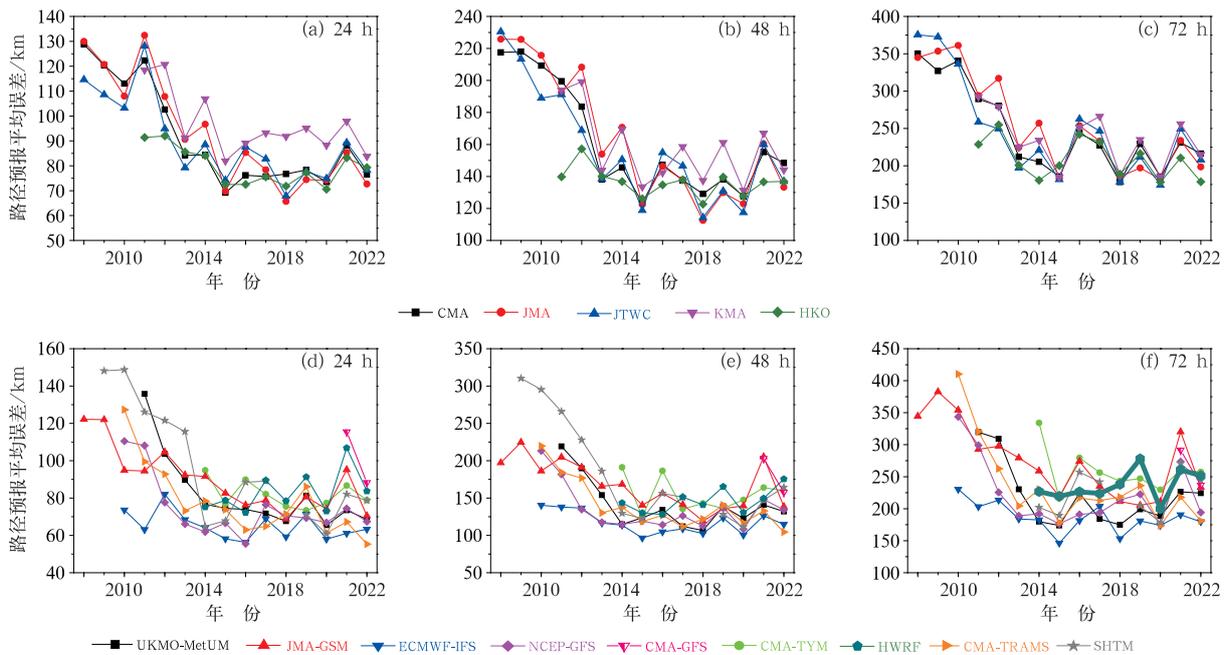


图 2 2008—2022 年(a,b,c)主观预报和(d,e,f)客观预报方法 24~72 h 预报时效的路径预报平均误差

Fig. 2 Annually-mean errors of track forecast by (a, b, c) subjective forecast and (d, e, f) objective forecast methods with 24—72 h lead time during 2008—2022

表 4 2022 年各预报方法的路径预报技巧评分 (单位: %)
Table 4 Track forecast skill scores (unit: %) by each forecast method in 2022

方法名称		预报时效/h		
		24	48	72
主观预报	CMA	69.0(259)	66.9(186)	70.7(127)
	JMA	71.7(256)	72.4(186)	74.0(131)
	JTWC	69.3(260)	69.8(192)	72.0(132)
	KMA	68.2(226)	69.3(167)	71.5(116)
	HKO	63.2(221)	67.4(165)	71.8(117)
客 观 预 报	CMA-GFS	64.3(248)	64.3(182)	65.3(124)
	NCEP-GFS	73.7(205)	70.5(158)	72.1(118)
	ECMWF-IFS	74.9(224)	73.3(167)	74.7(120)
	UKMO-MetUM	72.3(120)	69.6(86)	69.9(62)
	JMA-GSM	72.6(216)	69.3(155)	68.3(105)
预 报	SHTM	69.8(123)	62.4(88)	62.6(58)
	CMA-TRAMS	75.3(114)	74.4(84)	72.1(58)
	CMA-TYM	68.5(254)	63.9(187)	63.7(125)
	HWRF	67.5(185)	60.8(140)	62.8(107)
集成	SSTC	78.1(256)	76.5(188)	78.6(127)

注: 括号内为样本数, 单位: 个。

3.1.3 登陆点预报误差

2022 年以热带风暴及以上等级登陆我国的台风共有 4 个, 分别为 2203 号暹芭、2207 号木兰、2209 号马鞍和 2212 号梅花。其中, “暹芭”“木兰”“马鞍”各登陆我国 1 次, “梅花”登陆我国 4 次。“梅花”是 1949 年以来首次分别在我国 4 个不同省份登陆的台风, 也是 1949 年以来最晚登陆山东和辽宁的台风。

表 5 为 2022 年各主观预报和客观预报方法在台风登陆前 24 h 内发布的预报路径与海岸线的交点相对于台风实际登陆点之间的距离误差, 结果表明: 官方台风预报机构 24 h 内的登陆点预报误差总

体平均小于 50 km, 对“马鞍”在广东电白的登陆点预报误差均小于 40 km。CMA 对“梅花”在辽宁金州的登陆点预报误差最小。全球模式 24 h 内的登陆点预报平均误差为 30~50 km 不等。CMA-GFS 对“暹芭”和“马鞍”在广东电白、“梅花”在山东崂山的 24 h 内登陆点预报误差小于 30 km。区域模式 24 h 内的登陆点预报平均误差为 35~65 km 不等, SHTM 对“马鞍”在广东电白的 24 h 内登陆点预报误差相对较小, CMA-TRAMS 和 CMA-TYM 对“梅花”在浙江普陀和上海奉贤的 24 h 内登陆点预报误差相对较小。

表 5 2022 年各预报方法 24 h 内预报时效的登陆点预报误差 (单位: km)

Table 5 The 24 h landfall point forecast errors (unit: km) by each forecast method in 2022

台风	名称(编号)	暹芭(2203)	木兰(2207)	马鞍(2209)	梅花(2212)	梅花(2212)	梅花(2212)	梅花(2212)
	登陆地点	广东茂名电白	广东湛江徐闻	广东茂名电白	浙江舟山普陀	上海奉贤	山东青岛崂山	辽宁大连金州
主观预报	CMA	74.5	87.7	37.6	84.5	90.2	78.6	24.0
	JMA	48.7	55.6	39.0	40.7	34.2	7.9	#
	JTWC	26.0	*	3.8	28.6	26.5	18.9	43.4
	KMA	76.8	77.6	10.1	52.1	49.6	62.1	24.1
	HKO	71.3	72.7	27.6	51.5	36.4	8.5	77.0
客 观 预 报	CMA-GFS	30.0	65.7	24.9	69.3	69.1	22.1	35.6
	NCEP-GFS	115.0	*	*	13.0	0.0	38.4	64.7
	ECMWF-IFS	105.8	23.8	3.1	34.8	51.0	24.4	71.5
	UKMO-MetUM	9.3	17.5	40.6	30.0	20.4	57.4	121.0
	JMA-GSM	3.8	15.1	42.0	32.4	22.1	66.9	24.1
预 报	SHTM	94.7	64.9	10.1	59.2	41.1	93.9	91.1
	CMA-TRAMS	38.2	59.5	50.2	0.0	11.0	74.9	24.4
	CMA-TYM	116.7	78.0	42.1	26.1	29.3	74.9	60.0
	HWRF	*	*	*	38.1	30.6	62.1	43.2

注: “*”表示台风登陆前 24 h 内该预报方法没有预报数据, “#”表示该预报方法没有预报出登陆点。

3.2 集合预报

集合预报通常能较好地反映数值预报模式对台风预报的不确定性,台风集合路径和强度预报产品在业务预报中发挥着重要的作用(张璟等,2022)。图3为6个集合预报系统的集合平均路径预报误差,误差随预报时效的增长而增大。同样本比较表明(图3b):MSC-CENS各预报时效的路径预报平均误

差在所有参评的集合预报系统中较大,ECMWF-EPS 24~72 h 集合平均路径预报误差最小(24、36、48、60和72 h平均误差分别为65、90、125、175、220 km左右)。NCEP-GEFS 84~120 h 集合平均路径预报误差最小(84、96、108和120 h平均误差分别为285、320、390、450 km左右),JMA-GEPS次之。

图4为2022年6个集合预报系统各预报时效的集合离散度和集合平均路径预报误差双向分位的

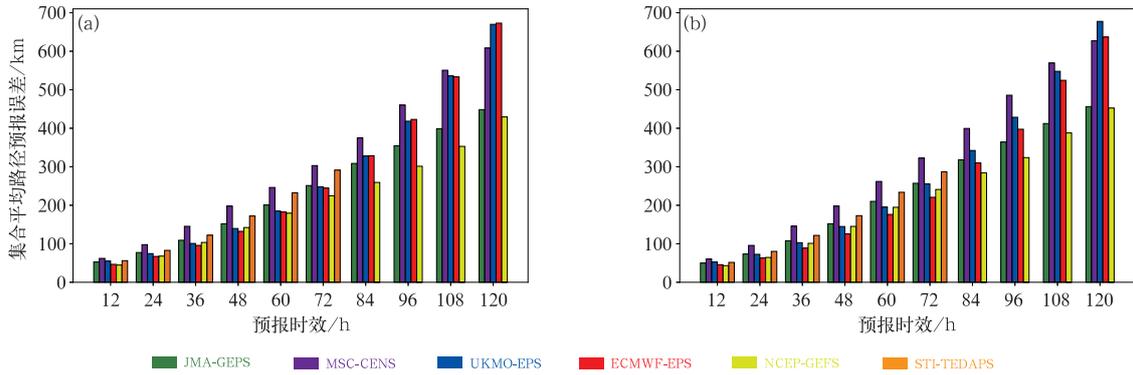


图3 2022年集合预报系统各预报时效(a)非同样本和(b)同样本集合平均路径预报误差
Fig. 3 Ensemble mean track forecast errors at each lead time by ensemble prediction systems in 2022 for (a) non-homogeneous and (b) homogeneous comparison

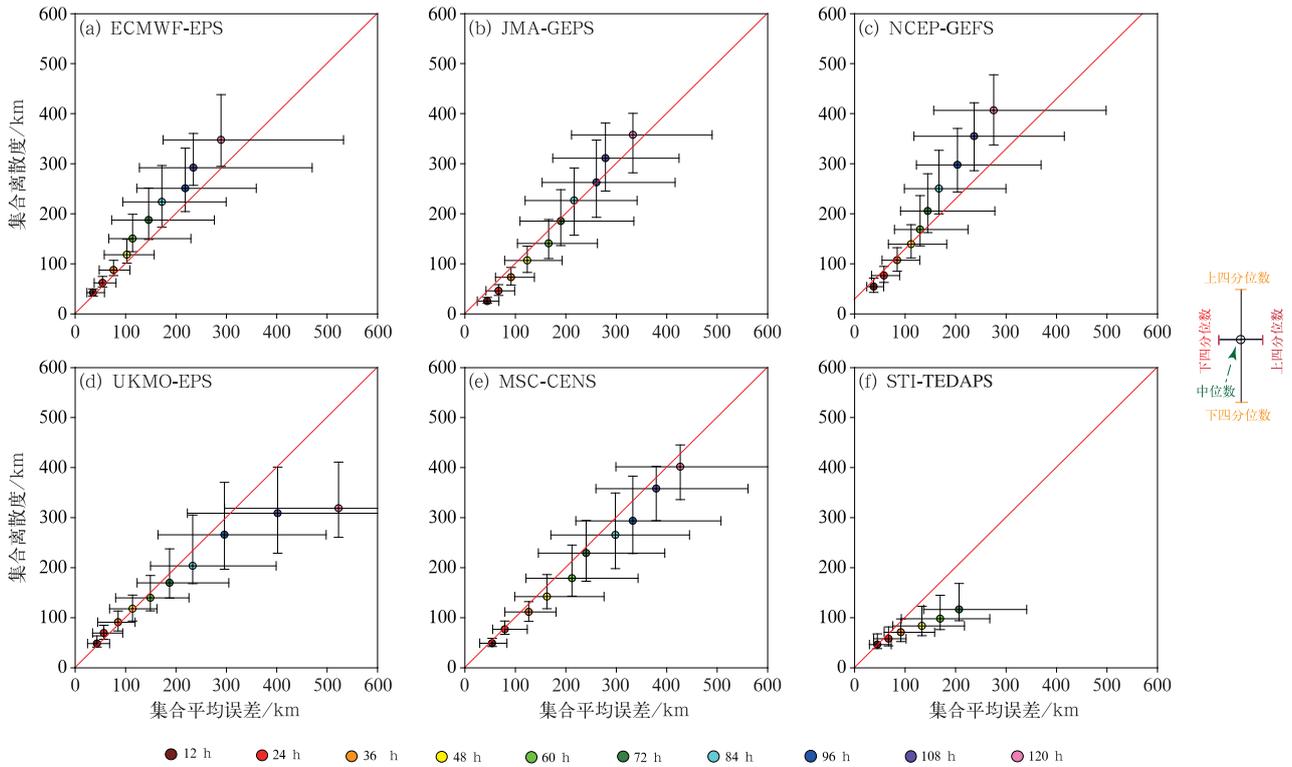


图4 2022年6个集合预报系统各预报时效的集合离散度和集合平均路径预报误差双向分位图
Fig. 4 Bi-directional quantitative chart of ensemble spreads and ensemble mean track forecast errors at each lead time by six ensemble prediction systems in 2022

图。ECMWF-EPS(图 4a)和 NCEP-GEFS(图 4c)各预报时效的集合离散度中位数大于集合平均路径预报误差中位数。随着预报时效递增,UKMO-EPS(图 4d)和 STI-TEDAPS(图 4f)集合平均路径预报误差的中位数逐渐超过离散度中位数,JMA-GEPS(图 4b)和 MSC-CENS(图 4e)集合离散度和集合平均路径预报误差的中位数基本相当。

若集合平均预报误差大于(小于)集合离散度,则代表集合预报系统倾向于低估(高估)台风路径预报的不确定性。因此,JMA-GEPS 和 MSC-CENS 较好地表达了 2022 年台风路径预报的不确定性,而 ECMWF-EPS 和 NCEP-GEFS 在一定程度上倾向于高估了台风路径预报的不确定性,UKMO-EPS 和 STI-TEDAPS 则倾向于低估了台风路径预报的不确定性。

4 台风强度预报精度评定

4.1 确定性预报

2022 年主观预报和客观预报方法强度(台风底层中心附近最大风速,下同)预报 MAE、预报趋势一致率(RCT)、均方根误差(RMSE)和样本数(SIZE)列于表 6。RCT 代表预报强度变化与实况强度变化的同号率(不同预报时效的强度变化以起

报时刻为准),RCT 越高代表预报强度变化与实况强度变化的一致性越好,即对于强度变化趋势有更好的预报性能。表 6 表明: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 4.5~5.5、6.7~7.6、6.8~8.2、5.9~7.2 和 5.5~7.3 $m \cdot s^{-1}$ 。全球模式中 NCEP-GFS 各预报时效的 MAE 和 RMSE 相对较小,RCT 相对较高。区域模式中 CMA-TRAMS 各预报时效的 MAE 和 RMSE 相对较小,而 HWRF 各预报时效的 RCT 相对较高。各主观预报和客观预报方法的强度预报共性特征为各预报时效的强度预报最大偏弱幅度普遍大于最大偏强幅度。2022 年台风快速增强多发(钱奇峰等,2023),对台风快速增强阶段的预报能力不足是极端性预报偏弱的主要原因之一。

强度预报 MAE 同样本比较表明(表略):5 个官方台风预报机构中,CMA 24 h 和 48 h 强度预报 MAE(4.3 $m \cdot s^{-1}$ 和 6.0 $m \cdot s^{-1}$)最小,JMA 72 h 和 96 h 强度预报 MAE(6.0 $m \cdot s^{-1}$ 和 5.1 $m \cdot s^{-1}$)最小,JTWC 120 h 强度预报 MAE(4.8 $m \cdot s^{-1}$)最小。5 个全球模式中,JMA-GSM 24 h 强度预报 MAE(7.0 $m \cdot s^{-1}$)最小,NCEP-GFS 48、72、96 和 120 h 强度预报 MAE(8.3、7.1、4.9 和 5.4 $m \cdot s^{-1}$)最小。4 个区域模式中,HWRF 24、48 和 72 h 强度预报 MAE(6.1、7.1 和 6.6 $m \cdot s^{-1}$)最小,其次为 CMA-TRAMS(6.9、7.7 和 7.5 $m \cdot s^{-1}$)。

表 6 2022 年各预报方法各预报时效的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 by each forecast method at each lead time in 2022

方法名称	预报时效/h																				
	24				48				72				96				120				
	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	4.5	78.6	6.6	280	6.7	81.1	9.2	201	7.5	77.0	11.0	135	6.9	76.5	9.1	85	7.3	76.8	8.7	56
	JMA	5.5	71.8	7.8	262	7.4	84.2	10.9	196	7.1	80.5	9.9	133	6.7	80.7	9.1	88	5.5	83.6	6.7	61
	JTWC	5.4	77.2	7.2	272	7.6	84.8	9.8	204	7.6	87.4	9.7	143	7.0	84.2	9.1	95	6.2	90.6	7.6	64
	KMA	5.1	73.8	7.3	237	6.7	78.5	9.2	177	6.8	81.3	9.4	123	5.9	82.5	7.8	80	6.0	80.0	7.2	55
	HKO	5.2	67.4	7.4	230	7.5	71.7	10.6	173	8.2	77.9	11.1	122	7.2	77.7	9.6	85	7.0	75.4	8.7	57
全球 模式	CMA-GFS	10.6	63.1	14.4	260	11.1	66.3	15.0	193	11.1	65.2	15.0	132	10.7	56.5	14.1	85	9.1	60.7	12.1	56
	NCEP-GFS	6.7	67.0	8.9	218	7.7	76.3	10.6	169	7.0	74.8	9.5	127	5.3	75.6	7.1	90	6.8	73.0	8.7	63
	ECMWF-IFS	11.0	72.7	14.2	234	11.6	75.0	15.1	176	10.9	76.6	14.3	128	10.3	66.7	13.1	45	11.8	65.5	14.4	29
	UKMO-MetUM	7.8	34.4	10.4	125	9.2	46.2	12.7	91	8.7	56.7	11.8	67	9.3	62.8	11.7	43	7.8	64.3	9.4	28
	JMA-GSM	6.5	70.0	8.8	227	9.7	73.3	13.0	165	10.7	67.8	14.2	115	13.7	59.2	16.8	76	13.5	66.0	16.4	50
区域 模式	SHTM	8.4	75.2	11.3	129	8.0	78.5	10.2	93	7.5	80.3	9.5	61	-	-	-	-	-	-	-	-
	CMA-TRAMS	5.8	68.9	7.9	119	6.9	76.4	8.6	89	7.1	80.7	8.6	62	-	-	-	-	-	-	-	-
	CMA-TYM	6.4	72.6	8.3	266	8.4	80.8	11.0	198	9.3	80.5	12.1	133	9.1	75.9	12.4	87	9.2	79.0	11.3	57
	HWRF	6.2	72.3	8.5	195	7.9	82.0	10.8	150	7.6	87.8	9.9	115	7.6	85.5	10.2	83	7.3	85.0	8.7	60

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;“-”表示该预报方法的台风报文在该预报时效没有预报数据。

进一步分析客观预报方法全年强度预报误差中位数,若强度预报误差中位数为负值(正值),代表预报强度偏弱(偏强)的概率大。结果表明,CMA-GFS、ECMWF-IFS、UKMO-MetUM 和 SHTM 强度预报偏弱(即低估台风强度)的概率大。HWRF 强度预报偏强(即高估台风强度)的概率大。NCEP-GFS、JMA-GSM、CMA-TRAMS 和 CMA-TYM 强度预报系统性偏差不明显。

纵向比较主观预报和客观预报方法历年强度预报 MAE(图 5),结果表明:2022 年官方台风预报机构强度预报 MAE 较 2021 年普遍有所增大,24、48、72 h 强度预报 MAE 比 2021 年分别增加了 0.1~1.1、0.9~2.1、0.7~2.3 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 不等。2022 年全球模式和区域模式中仅 CMA-TRAMS 和 UKMO-MetUM 各预报时效的强度预报 MAE 较 2021 年有所减小。近十年(2013—2022 年),主观预报和客观预报方法的路径预报平均误差没有呈现持续减小的趋势,近五年(2018—2022 年)官方台风预报机构 24、48 和 72 h 强度预报 MAE 大体在 4.0~5.0、5.0~7.5、5.0~8.0 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$,CMA 各预报时效的强度预报 MAE 相对较小,全球模式和区域模式中 NCEP-

GFS、CMA-TYM 和 HWRF 强度预报 MAE 相对较小。

4.2 技巧评分

2022 年各主观预报和客观预报方法相对于气候持续法的强度预报技巧评分列于表 7。5 个官方台风预报机构 24、48 和 72 h 强度预报均为正技巧,24、48 和 72 h 技巧评分区间分别为 26.0%~37.3%、17.4%~29.1%和 21.8%~51.2%,CMA 24 h 技巧评分最高。对于 24、48 和 72 h,客观预报方法中 NCEP-GFS、UKMO-MetUM、JMA-GSM、CMA-TRAMS、CMA-TYM 和 HWRF 均达到正技巧,全球模式中 NCEP-GFS 技巧评分最高(分别为 13.3%、23.5%、43.9%),区域模式中 HWRF 技巧评分最高(分别为 32.3%、34.6%、46.2%),其次为 CMA-TRAMS(分别为 27.1%、30.0%、39.7%)。进一步分析历年强度预报技巧评分,近五年(2018—2022 年)5 个官方台风预报机构 24 h 和 48 h 均为正技巧,且技巧评分变化趋势大体一致,差别为 10%~20%。

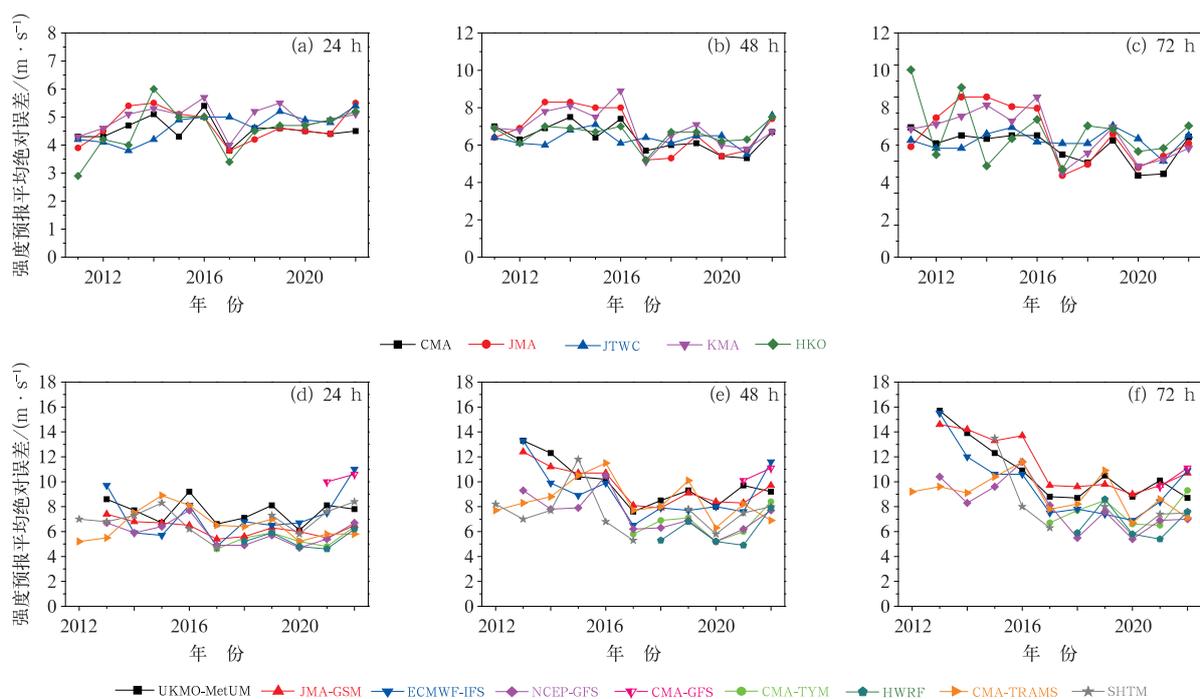


图 5 2011—2022 年(a, b, c)主观预报和(d, e, f)客观预报方法 24~72 h 预报时效的强度预报平均绝对误差
Fig. 5 Annually-mean absolute errors of intensity forecasts by (a, b, c) subjective forecast and (d, e, f) objective forecast methods with 24—72 h lead times during 2011—2022

表 7 2022 年各预报方法的强度预报技巧评分(单位:%)

Table 7 Intensity forecast skill scores (unit:%) by each forecast method in 2022

方法名称		预报时效/h		
		24	48	72
主观预报	CMA	37.3(216)	28.9(158)	40.0(70)
	JMA	26.3(192)	27.8(147)	51.2(66)
	JTWC	33.1(211)	26.0(159)	21.8(71)
	KMA	26.0(189)	29.1(139)	42.2(64)
	HKO	29.8(172)	17.4(129)	23.0(67)
客 观	CMA-GFS	-42.8(210)	-18.5(154)	7.1(69)
	NCEP-GFS	13.3(158)	23.5(126)	43.9(62)
	ECMWF-IFS	-39.0(192)	-10.1(146)	10.7(70)
	UKMO-MetUM	0.1(97)	9.7(71)	30.9(32)
	JMA-GSM	17.1(201)	10(148)	5.0(68)
报	SHTM	-13.0(105)	14.2(74)	29.6(32)
	CMA-TRAMS	27.1(95)	30.0(70)	39.7(33)
	CMA-TYM	16.8(216)	12.2(159)	1.3(69)
	HWRP	32.3(153)	34.6(121)	46.2(62)

注:括号内为样本数,单位:个。

5 结 论

本文对 2022 年西北太平洋及南海台风的业务定位定强精度,以及路径和强度预报精度进行评定,主要结论如下:

(1)2022 年,CMA 定位平均误差和定强 MAE 最小,定位平均误差(15.4 km)较 2021 年(19.7 km)减小 21.8%,定强 MAE(1.3 m · s⁻¹)较 2021 年(1.4 m · s⁻¹)略减小。此外,官方台风预报机构定位误差与台风强度等级呈负相关。

(2)2015—2022 年官方台风预报机构历年 24、48、72 h 路径预报平均误差区间大体为 65~100、110~160、175~255 km。2022 年,主观预报和客观预报方法路径预报平均误差较 2021 年普遍有所减小。全球模式中 ECMWF-IFS 路径预报平均误差普遍最小,区域模式中 CMA-TRAMS 平均误差最小。SSTC、CMA-TRAMS 和 ECMWF-IFS 路径预报技巧评分相对较高,SSTC 相比全球模式和区域模式存在一定优势。

(3)JMA-GEPS 和 MSC-CENS 较好地表达了 2022 年路径预报的不确定性,而 ECMWF-IFS 和 NCEP-GEFS 在一定程度上倾向于高估了路径预报的不确定性,UKMO-IFS 和 STI-TEDAPS 则倾向于低估了路径预报的不确定性。

(4)2018—2022 年官方台风预报机构 24、48 和 72 h 台风强度预报 MAE 大体为 4.0~5.0、5.0~7.5、5.0~8.0 m · s⁻¹。2022 年,NCEP-GFS、

JMA-GSM、CMA-TRAMS 和 CMA-TYM 强度预报系统性偏差不明显,NCEP-GFS、HWRP 和 CMA-TRAMS 强度预报技巧评分相对较高。

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).

陈笑,赵东,何晓凤,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).

端义宏,陈联寿,王元,2022. 登陆台风异常变化机理[M]. 北京:科学出版社. Duan Y H, Chen L S, Wang Y, 2022. Mechanisms of unusual variations of landfalling typhoons [M]. Beijing: Science Press(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]. J Meteor Sci,39(6):839-846(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 Centre[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).
- 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).
- 钱传海,端义宏,麻素红,等,2012.我国台风业务现状及其关键技术[J].气象科技进展,2(5):36-43. Qian C H, Duan Y H, Ma S H, et al, 2012. The current status and future development of China operational typhoon forecasting and its key technologies[J]. Adv Meteor Sci Technol, 2(5):36-43(in Chinese).
- 钱奇峰,董林,许映龙,等,2023.2022年西北太平洋和南海台风活动特征和预报难点分析[J].气象,49(10):1254-1266. Qian Q F, Dong L, Xu Y L, et al, 2023. Analysis on the characteristics and forecast difficulties of the typhoons over the Northwest Pacific and the South China Sea in 2022[J]. Meteor Mon, 49(10):1254-1266(in Chinese).
- 钱奇峰,毛冬艳,2023.2010—2019年ECWMF和NCEP集合模式对热带气旋路径预报的性能评估[J].气象,49(2):224-234. Qian Q F, Mao D Y, 2023. Evaluation of tropical cyclone track forecast performance of ECMWF and NCEP ensemble models from 2010 to 2019[J]. Meteor Mon, 49(2):224-234(in Chinese).
- 瞿安祥,麻素红,张进,等,2022.CMA-GFS全球预报系统中的台风初始化[J].气象学报,80(2):269-279. Qu A X, Ma S H, Zhang J, et al, 2022. Typhoon initialization in the CMA global forecast system[J]. Acta Meteor Sin, 80(2):269-279(in Chinese).
- 沈学顺,陈起英,孙健,等,2021.中央气象台全球中期数值预报业务系统的发展[J].气象,47(6):645-654. Shen X S, Chen Q Y, Sun J, et al, 2021. Development of operational global medium-range forecast system in National Meteorological Centre[J]. Meteor Mon, 47(6):645-654(in Chinese).
- 王靖,许映龙,董林,等,2022.2012—2021年中央气象台台风3~5 d 路径预报误差分析[J].海洋预报,39(6):25-33. Wang Q, Xu Y L, Dong L, et al, 2022. Analysis of typhoon track forecast errors for 3~5 days by Central Meteorological Observatory from 2012 to 2021[J]. Marine Forecasts, 39(6):25-33(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).
- 许映龙,张玲,高控柱,2010.我国台风预报业务的现状及思考[J].气象,36(7):43-49. Xu Y L, Zhang L, Gao S Z, 2010. The advances and discussions on China operational typhoon forecasting[J]. Meteor Mon, 36(7):43-49(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).
- 余贞寿,冀春晓,张红蕾,等,2020.涡旋追踪技术在浙江区域模式台风定位定强中的应用研究[J].气象,46(11):1461-1473. Yu Z S, Ji C X, Zhang H L, et al, 2020. Application of GFDL vortex tracker technique to the Zhejiang regional NWP models[J]. Meteor Mon, 46(11):1461-1473(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].北京:气象出版社:38-41. China Meteorological Administration, 2012. Regulations on Typhoon Operations and Services[M]. Beijing: China Meteorological Press:38-41(in Chinese).
- 中国气象局,2022.热带气旋年鉴 2020[M].北京:气象出版社. China Meteorological Administration, 2022. Yearbook of Tropical Cyclone 2020[M]. Beijing: China Meteorological Press (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.
- 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.
- Haiden T, Janousek M, Vitart F, et al, 2021. Evaluation of ECMWF forecasts, including the 2021 upgrade[R]. Reading: ECMWF.
- 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-4DVar) 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.
- Magnusson L, Majumdar S, Emerton R, et al, 2021. Tropical cyclone activities at ECMWF[R]. Reading: ECMWF.
- 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.
- Yamaguchi H, Adachi Y, Hirahara S, et al, 2022. (2022-03-15) [2023-12-29]. Upgrade of JMA's global ensemble prediction system[R/OL]. https://wgne.net/bluebook/uploads/2022/docs/06_Yamaguchi_Haruki_JMAGEPS2203.pdf.
- 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, 2021. Upgrades to JMA's operational NWP high-resolution global model[R]. Tokyo: Japan Meteorological Agency.
- 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:张芳)