

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).

2021 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^{1,2,3,4} 张喜平^{1,2,3} 白莉娜^{1,2,3} 万日金^{1,2,3} 曹庆⁵

- 1 中国气象局上海台风研究所,上海 200030
- 2 上海亚太台风研究中心,上海 201306
- 3 中国气象局台风数值预报重点实验室,上海 200030
- 4 温州市台风监测预报技术重点实验室,浙江温州 325000
- 5 上海海洋中心气象台,上海 200030

提 要: 以中国气象局上海台风研究所整编的“西北太平洋热带气旋最佳路径数据集”为基准,评定了 2021 年西北太平洋和南海海域共 22 个编号台风的定位定强精度以及路径、强度、登陆点预报精度。评定结果表明:2021 年,中央气象台的平均定位误差为 19.7 km,较 2020 年(22.7 km)减少 13%,平均定强误差为 $1.4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,较 2020 年($1.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)略增大。国内外官方台风预报机构、全球模式及区域模式的全年路径预报平均误差较 2020 年有所增大,近十年(2012—2021 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。各预报方法的强度预报平均绝对误差在 2012—2017 年有了一定程度的减小,但在 2018—2021 年没有呈现减小趋势。各主观预报和客观预报方法普遍对台风小熊、烟花、查帕卡、狮子山和圆规的 24 h 登陆点预报较好。

关键词: 台风,定位定强误差,路径预报误差,强度预报误差,登陆点预报误差

中图分类号: P456

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2023.051101

Verification on Typhoons Forecasts over the Western North Pacific and the South China Sea in 2021

YANG Mengqi^{1,2,3} CHEN Guomin^{1,2,3,4} ZHANG Xiping^{1,2,3}
BAI Lina^{1,2,3} WAN Rijin^{1,2,3} CAO Qing⁵

- 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
- 4 Wenzhou Key Laboratory of Typhoon Monitoring and Forecasting Technology, Zhejiang, Wenzhou 325000
- 5 Shanghai Marine Central Meteorological Observatory, Shanghai 200030

Abstract: Based on the Tropical Cyclones Best Track Dataset for the Western North Pacific compiled by the Shanghai Typhoon Institute of China Meteorological Administration (CMA), the positioning errors and intensity estimation errors as well as the track, intensity and landfall forecast errors of the 22 named typhoons over Western North Pacific and South China Sea in 2021 are evaluated. The verification results show that the average positioning error of typhoons made by the National Meteorological Centre, CMA, in 2021 was 19.7 km, which was 13% less than that of 2020 (22.7 km). The average intensity estimation error

* 国家重点研发计划(2021YFC3000805)和中国气象局创新发展专项(CXFZ2022J027)共同资助

2022 年 12 月 5 日收稿; 2023 年 7 月 9 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

was $1.4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, which was slightly higher than that of 2020 ($1.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$). The average annual track forecast errors of the official typhoon forecast agencies, global models, and regional models at home and abroad have increased compared to the errors in 2020, and the average track forecast errors of subjective and objective forecasting methods failed to have a continuous decreasing trend in 2012–2021. The mean absolute errors of intensity forecasts of all forecasting methods have generally decreased to some extent from 2012 to 2017, but did not show a decreasing trend in 2018–2021. The subjective and objective forecasting methods generally performed well in forecasting the 24 h landfall points for the typhoons Koguma, In-Fa, Cempaka, Lionrock and Kompasu.

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

引 言

中国是全球受台风灾害影响损失最严重的国家之一,随着我国沿海、内陆和海洋经济建设的快速发展以及全球气候变化的加剧,台风灾害脆弱性和适应性面临着挑战(IPCC, 2022)。21 世纪以来,登陆我国的台风有增强和增多的趋势(端义宏等, 2022), 年尺度及台风影响关键期(7—9 月)各月全国台风造成的直接经济损失呈增加趋势(高歌等, 2019), 因此提高台风预报精度对降低人民生命和财产损失具有十分重要的意义,而台风预报精度评定是使用好数值预报产品的基础和首要工作(李泽椿等, 2020), 也是推动台风预报体系发展的重要组成部分。

为了统一和规范我国台风预报检验的内容和指标, 2019 年发布了关于台风预报检验的中华人民共和国国家标准(全国气象防灾减灾标准化技术委员会, 2019)。为了评估全球台风预报模式的预报性能, 世界天气研究计划架构下的数值试验工作组于 1991 年将全球模式的台风预报性能纳入了模式比较计划, 目前共有 12 个全球模式参与该项比较计划(Muroi and Sato, 1994; Tsuyuki et al, 2002; Yamaguchi et al, 2017)。美国国家飓风中心(National Hurricane Center, NHC)基于 NHC 台风最佳路径对大西洋和东北太平洋海域热带气旋进行年度评估(Cangialosi, 2022)。日本气象厅(Japan Meteorological Agency, JMA)基于东京区域气象中心的台风最佳路径对 JMA 的台风数值预报模式进行年度评估。中国气象局上海台风研究所自 2010 年至今, 在世界气象组织登陆台风预报示范项目(WMO-TLFDP)、联合国亚太经社会/世界气象组织(UNESCAP/WMO)台风委员会年度优先计划等相关项目和计划的支撑下, 对西北太平洋和南海台

风路径与强度预报性能进行年度评估(陈国民等, 2021; 2022; Lei et al, 2019)。本文基于台风所最佳路径数据, 利用多指标配合的热带气旋预报检验可视化分析技术(杨梦琪和陈国民, 2022), 对 2021 年西北太平洋和南海海域 22 个编号台风的定位定强, 以及路径、强度、登陆点预报精度进行评定, 以期为台风业务预报、模式研发改进及台风防灾减灾提供参考。

1 资料与方法

1.1 台风最佳路径资料

采用中国气象局上海台风研究所整编的“西北太平洋热带气旋最佳路径数据集”, 以最佳路径数据集中热带风暴级及以上级别的样本为基准。该数据集从中国气象局热带气旋资料中心(<http://tcdata.typhoon.org.cn>)获取, 现行版本包含 1949 年以来西北太平洋(含南海、赤道以北、 180°E 以西)海域台风逐 6 h 的位置和强度。2018 年起, 对于登陆我国的台风, 在其登陆前 24 h 及在我国陆地活动期间, 将最佳路径时间频次加密为逐 3 h 一次(Lu et al, 2021; Ying et al, 2014)。

2021 年西北太平洋和南海海域共有 22 个台风活动(热带风暴级及以上), 其中热带风暴级(tropical storm, TS)有 7 个, 强热带风暴级(severe tropical storm, STS)有 4 个, 台风级(typhoon, TY)有 5 个, 强台风级(severe typhoon, STY)有 1 个, 超强台风级(super typhoon, SuperTY)有 5 个(表 1)。

1.2 台风定位定强和预报资料

本文对 2021 年 5 个官方台风预报机构的定位

定强数据、14 个确定性预报方法(5 个官方台风预报机构、5 个全球模式、4 个区域模式)的路径和强度预报,以及 6 个集合预报系统的路径预报精度进行评定。

确定性预报方法中,官方台风预报机构包含:中央气象台、日本气象厅、美国联合台风警报中心(Joint Typhoon Warning Center, JTWC)、韩国气象厅及香港天文台。全球模式包含:中国气象局全球同化预报系统(Global Forecast System of the China Meteorological Administration, CMA-GFS)(瞿安祥等,2022;沈学顺等,2021)、美国国家环境预测中心全球预报系统(Global Forecast System of the National Centers for Environmental Prediction, NCEP-GFS)(Zhou and Juang, 2023)、欧洲中期天气预报中心综合预报系统(Integrated Forecasting System of the European Centre for Medium-Range

Weather Forecasts, ECMWF-IFS)(Haiden et al, 2021; Magnusson et al, 2021)、英国数值(Unified Model of the United Kingdom Meteorological Office, UKMO-MetUM)(Heming, 2016; Short and Petch, 2018),以及日本数值(Global Spectral Model of the JMA, JMA-GSM)。区域模式包含:上海台风模式、中国气象局南海台风数值预报系统(Tropical Regional Atmospheric Model System of South China Sea of the CMA, 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(China Meteorological Administration Typhoon Model, CMA-TYM)(麻素红等,2021a; 2021b),以及上海台风研究所区域台风数值预报系统(Global Regional Assimilation and Prediction System-Tropical Cyclone Model, GRAPES-TCM)(Tan et al, 2022)。

集合预报系统包含:上海台风研究所台风集合

表 1 2021 年西北太平洋和南海的 22 个台风

Table 1 Twenty-two typhoons over the Western North Pacific and the South China Sea in 2021

台风编号	台风名称	等级	中心气压极值/hPa	近中心最大风速极值/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
2101	杜鹃	热带风暴	990	23
2102	舒力基	超强台风	895	72
2103	彩云	热带风暴	995	20
2104	小熊	热带风暴	992	20
2105	蔷薇	台风	980	33
2106	烟花	强台风	955	42
2107	查帕卡	台风	965	38
2108	尼伯特	热带风暴	995	20
2109	卢碧	热带风暴	982	23
2110	银河	强热带风暴	985	25
2111	妮妲	强热带风暴	990	25
2112	奥麦斯	强热带风暴	992	25
2113	康森	强热带风暴	988	28
2114	灿都	超强台风	905	68
2115	电母	热带风暴	998	18
2116	蒲公英	超强台风	920	60
2117	狮子山	热带风暴	990	20
2118	圆规	台风	970	33
2119	南川	台风	975	33
2120	玛瑙	台风	970	40
2121	妮亚图	超强台风	940	55
2122	雷伊	超强台风	915	62

同化预报系统(Typhoon Ensemble Data Assimilation and Prediction System of the Shanghai Typhoon Institute, STI-TEDAPS)(Li et al, 2019; 张璟等,2022)、欧洲中期天气预报中心全球集合预报系统(Ensemble Prediction System of the ECMWF,

ECMWF-EPS)(Magnusson et al, 2021; Palmer, 2019)、日本气象厅全球集合预报系统(Global Ensemble Prediction System of the JMA, JMA-GEPS)(Yamaguchi et al, 2022)、美国国家环境研究中心全球集合预报系统(Global Ensemble Forecast

System of the NCEP, NCEP-GEFS) (Zhou et al, 2022)、英国气象局集合预报系统(Ensemble Prediction System of the UKMO, UKMO-EPS) (Inverarity et al, 2023)、加拿大气象局集合预报系统(Canadian Ensemble System of the Meteorological Service of Canada, MSC-CENS) (Gagnon and Deng, 2019)。

客观台风预报方法中, CMA-GFS、NCEP-GFS、JMA-GSM、CMA-TYM、JMA-GEFS、NCEP-GEFS、UKMO-EPS 每日起报 4 次(北京时间 02、08、14、20 时), ECMWF-IFS、UKMD-MetUM、上海台风模式、CMA-TRAMS、GRAPES-TCM、ECMWF-IFS、MSC-CENS 和 STI-TEDAPS 每日起报 2 次(北京时间 08 和 20 时)。NCEP-GFS 和 ECMWF-IFS 最长预报时效为 240 h, UKMD-MetUM 最长预报时效为 144 h, JMA-GSM 最长预报时效为 132 h, CMA-GFS 和 CMA-TYM 最长预报时效为 120 h, 上海台风模式、CMA-TRAMS 和 GRAPES-TCM 最长预报时效均为 72 h。

1.3 评定方法

本文台风预报精度评定参照《台风业务和服务规定》台风分析和预报质量评定方法(中国气象局, 2012)和台风预报检验国家标准(全国气象防灾减灾

标准化技术委员会, 2019)。

2 台风定位和定强精度

台风定位定强是台风预报的基础, 定位定强的精度不仅对台风路径和强度预报有着至关重要的影响, 也会影响台风大风、暴雨、风暴潮的预报准确性(钱传海等, 2012; 王志烈和李多武, 1981; 余贞寿等, 2020), 提高台风中心位置及强度监测水平对于改进台风分析预报精度, 从而减少台风的灾害影响具有重要意义(刘思琦等, 2021)。

对国内外官方台风预报机构的定位定强精度进行评定, 以台风业务定位与最佳路径数据集中相应的位置之间的大圆距离作为定位误差, 以台风业务定强与最佳路径数据集中相应的强度之差的绝对值作为定强误差(即定强绝对误差), 以台风业务定强与最佳路径数据集中相应的强度之差作为定强偏差。表 2 是根据 2021 年最佳路径数据集中的 TS 级及以上级别的样本, 计算得到的 5 个官方台风预报机构全年平均定位和定强误差。2021 年, 年平均定位和定强误差最小的为中央气象台, 年平均定位误差(19.7 km)较 2020 年(22.7 km)减少 13%, 年平均定强误差($1.4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)较 2020 年($1.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)略增大。

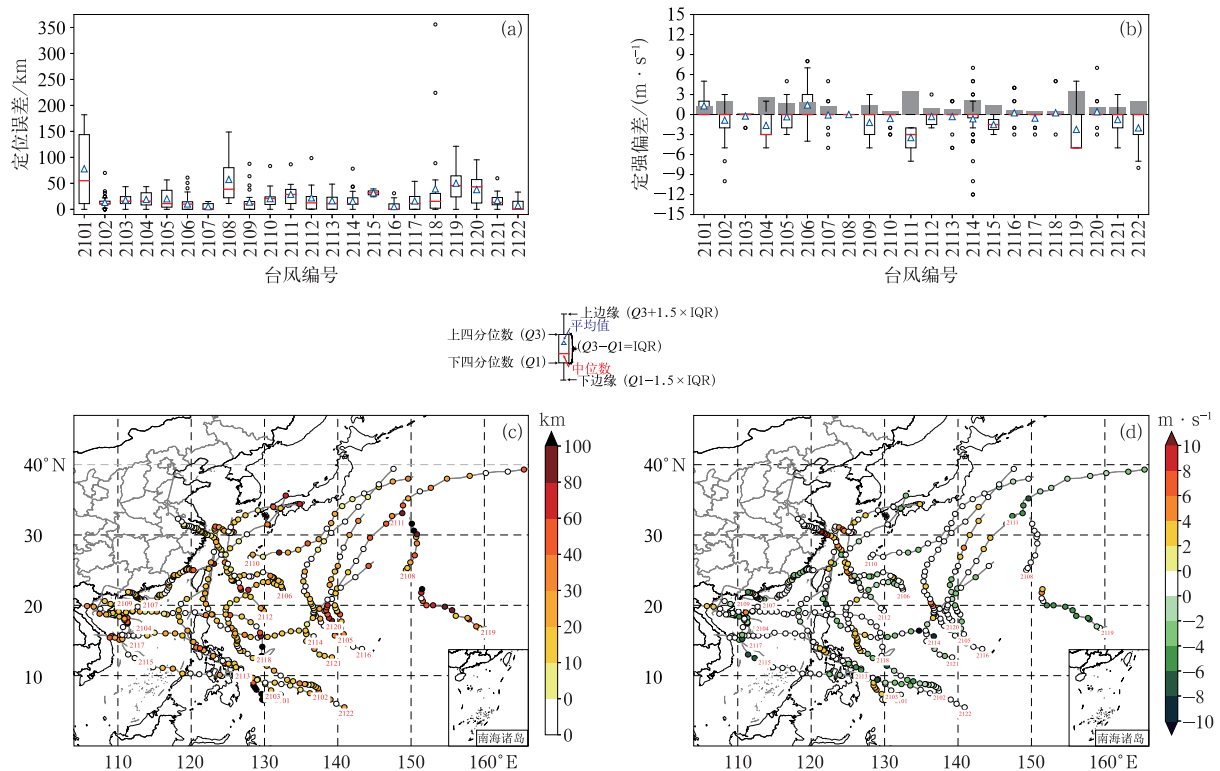
表 2 2021 年官方台风预报机构对 22 个台风的平均定位和定强误差
Table 2 Mean positioning errors and intensity estimation errors of the 22 typhoons by the official typhoon forecast agencies in 2021

方法名称	中央气象台	日本气象厅	JTWC	韩国气象厅	香港天文台
定位次数/次	472	501	435	440	392
定位误差/km	19.7	27.6	23.8	27.7	24.5
定强次数/次	472	501	435	440	390
定强误差/ $(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	1.4	2.7	3.1	3.4	2.2

2021 年中央气象台全年业务定位误差样本(472 个)中, 定位无偏差的样本(133 个)占比为 28.2%, 定位误差大于 0 km 且小于 50 km 的样本(300 个)占比 63.6%。定位误差超过 100 km 的样本(11 个)占比为 2.3%, 主要集中在出现在 2101 号热带风暴杜鹃、2108 号热带风暴尼伯特及 2118 号台风圆规。定位误差较大的样本的共同特征是台风强度较弱, 结构松散或有多个环流中心, 并且处于远海, 业务定位仅能参考实时卫星资料, 给台风业务定位带来了一定挑战。而在雷达和地面加密自动站资料的支撑下, 近海和登陆台风的定位误差普遍较小

(图 1c)。

2021 年中央气象台全年业务定强偏差样本(472 个)中, 定强无偏差的样本(274 个)占比为 58.1%, 定强偏强的样本(76 个, 平均偏强 $3.3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)占比为 16.1%, 定强偏弱的样本(122 个, 平均偏弱 $3.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)占比为 25.8%。定强偏差离散程度较大的为 2114 号超强台风灿都, 主要由定强异常偏强和异常偏弱样本造成(图 1b)。根据中央气象台定强偏差空间分布(图 1d), 定强极端偏弱的样本出现在“舒力基”加强为超强台风的初期, 以及“灿都”加强为超强台风的前期。定强极端偏强的样本



注:图 b 中灰色柱代表台风的平均定强绝对误差;图 c,d 圆点位置代表中央气象台对台风的业务定位,圆点色彩分别映射定位误差和定强偏差。

图 1 中央气象台对 2021 年 22 个台风的(a,c)定位误差和(b,d)定强偏差(a,b)箱线图和(c,d)空间分布图
Fig.1 (a, b) Boxplots and (c, d) spatial distributions of (a, c) positioning error and (b, d) intensity estimation bias of the National Meteorological Centre, CMA, for 22 typhoons in 2021

出现在“烟花”登陆浙江舟山之后直至二次登陆浙江平湖之前,“灿都”在上海以东洋面上减弱为强热带风暴之际,以及“玛瑙”减弱为强热带风暴阶段。

3 台风路径预报误差

3.1 确定性预报误差

3.1.1 非同样本评定

表 3 为 2021 年国内外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和样本数。5 个官方台风预报机构 24、48、72、96 和 120 h 预报时效的路径预报平均误差区间分别为 83.2~97.9、136.6~167.0、210.5~256.1、293.0~340.6 和 353.1~429.2 km。数值预报为台风业务预报,特别是路径预报提供了客观的技术支撑,但数值预报模式与主观预报相比存在滞后,所以 24、48、72、

96 和 120 h 预报时效的主观预报大体上参考 36、60、84、108 和 132 h 预报时效的数值预报。5 个全球模式 36、60、84、108 和 132 h 预报时效的路径预报平均误差区间分别为 89.7~156.2、152.8~258.4、228.9~395.8、324.3~506.2 和 396.6~615.8 km。4 个区域模式 36 h 和 60 h 预报时效的路径预报平均误差区间分别为 93.3~155.0 和 167.4~274.0 km。各预报方法的路径预报平均误差较 2020 年有所增大。近十年(2012—2021 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(图 2)。

图 3 为 2021 年官方台风预报机构、全球模式及区域模式 24、48、72、96 和 120 h 路径预报误差箱线图,部分预报方法存在路径预报误差较大的样本,这是导致其全年平均误差偏大的原因之一。全球模式中,ECMWF-IFS 的 24、48、72 和 96 h 路径预报误差极值分别在 200、600、1000 和 1300 km 左右,120 h 路

表 3 2021 年官方台风预报机构、全球模式及区域模各预报时效的路径预报平均误差(单位:km)
Table 3 Mean errors (unit: km) of track forecasts by the official typhoon forecast agencies, global models, and regional models at each lead time in 2021

不同方法	预报时效/h											
	12	24	36	48	60	72	84	96	108	120	132	
主观 预报	中央气象台	56.7(423)	88.3(383)	125.2(333)	155.2(290)	195.8(257)	231.1(223)	—	298.8(164)	—	353.1(114)	—
	日本气象厅	51.3(198)	85.3(427)	—	160.3(331)	—	233.9(250)	—	336.0(160)	—	396.1(110)	—
	JTWC	56.6(424)	89.3(399)	122.8(362)	160.0(328)	—	249.2(258)	—	328.6(187)	—	414.9(137)	—
	韩国气象厅	61.0(411)	97.9(376)	135.8(338)	167.0(301)	161.9(14)	256.1(239)	281.9(1)	340.6(182)	—	429.2(135)	—
	香港天文台	—	83.2(330)	—	136.6(276)	—	210.5(220)	—	293.0(169)	—	399.9(127)	—
全球 模式	CMA-GFS	74.5(291)	115.5(269)	156.5(246)	203.0(222)	251.2(200)	291.7(178)	353.0(161)	388.1(141)	462.8(127)	526.0(114)	—
	NCEP-GFS	49.7(385)	74.4(360)	108.9(328)	148.1(298)	206.6(269)	273.5(243)	327.8(215)	378.3(187)	434.2(165)	529.4(147)	615.8(127)
	ECMWF-IFS	42.2(195)	61.1(177)	89.7(158)	126.2(139)	152.8(122)	190.5(109)	228.9(94)	276.4(79)	324.3(69)	390.2(61)	396.6(51)
	UKMD-MetUM	49.0(205)	73.5(187)	104.2(171)	140.9(154)	176.5(135)	226.5(117)	281.1(102)	351.1(86)	375.1(72)	405.7(65)	436.2(61)
	JMA-GSM	55.1(327)	95.2(299)	145.9(268)	205.2(245)	258.4(218)	320.2(198)	395.8(179)	448.3(157)	506.2(137)	536.0(117)	589.0(103)
区 域 模 式	上海台风模式	58.6(194)	82.1(177)	106.1(159)	147.3(140)	204.8(128)	270.8(115)	—	—	—	—	—
	CMA-TRAMS	47.6(195)	67.2(181)	93.3(166)	132.8(149)	167.4(134)	217.9(119)	—	—	—	—	—
	CMA-TYM	59.3(404)	86.7(377)	118.6(350)	164.1(319)	215.9(288)	261.1(260)	326.3(225)	394.3(197)	463.8(171)	551.6(150)	—
	GRAPES-TCM	77.9(176)	107.2(167)	155.0(156)	209.3(142)	274.0(130)	333.5(119)	—	—	—	—	—

注:括号内为各预报时效的样本数,单位:个。“—”表示该预报方法在该预报时效没有预报数据。

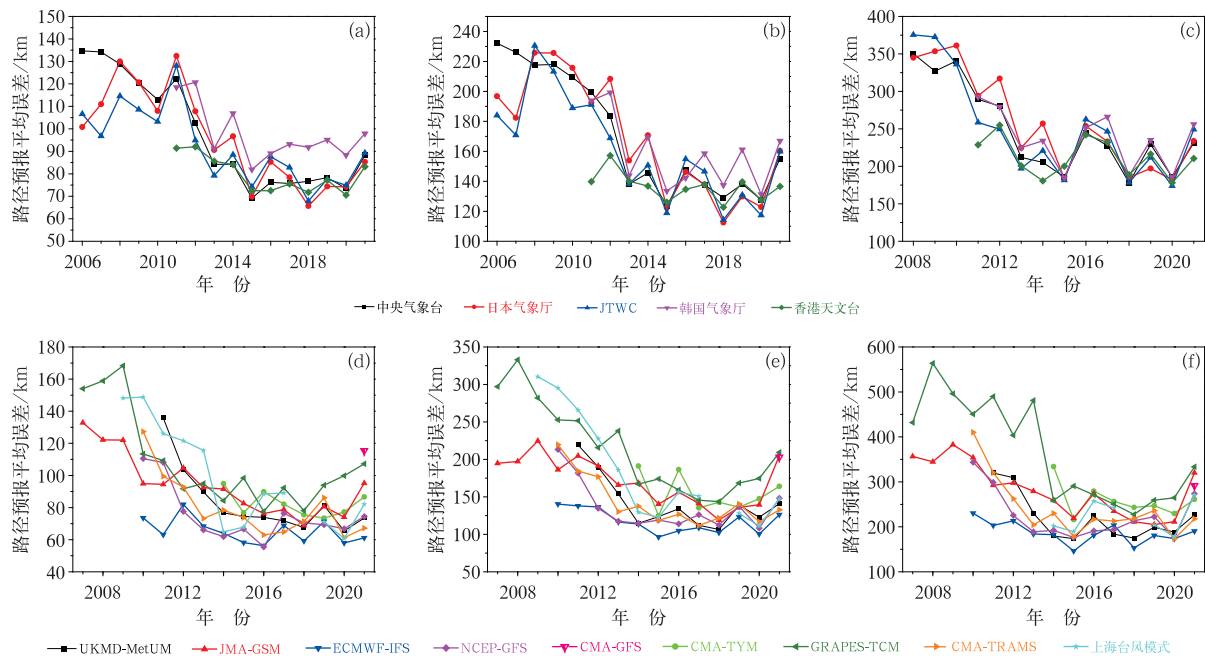


图 2 历年(a,d)24 h,(b,e)48 h和(c,f)72 h 台风路径预报平均误差
(a,b,c)官方台风预报机构,(d,e,f)全球模式及区域模式

Fig. 2 Average errors of typhoon track forecasts over the years at (a, d) 24 h, (b, e) 48 h, and (c, f) 72 h lead times by (a, b, c) official typhoon forecast agencies and (d, e, f) global models and regional models

径预报误差极值最小的为英国数值(1192.9 km), ECMWF-IFS 24~96 h 路径预报误差极值和 24~120 h 路径预报误差中位数小于其他全球模式。区域模式中,24、48 h 和 72 h 路径预报误差中位数最

小的为 CMA-TRAMS,且 CMA-TRAMS 的 48 和 72 h 路径预报误差极值最小。

图 4 为各客观预报方法 2021 年 120 h 预报时效沿着台风实际移动方向误差(alone track error,

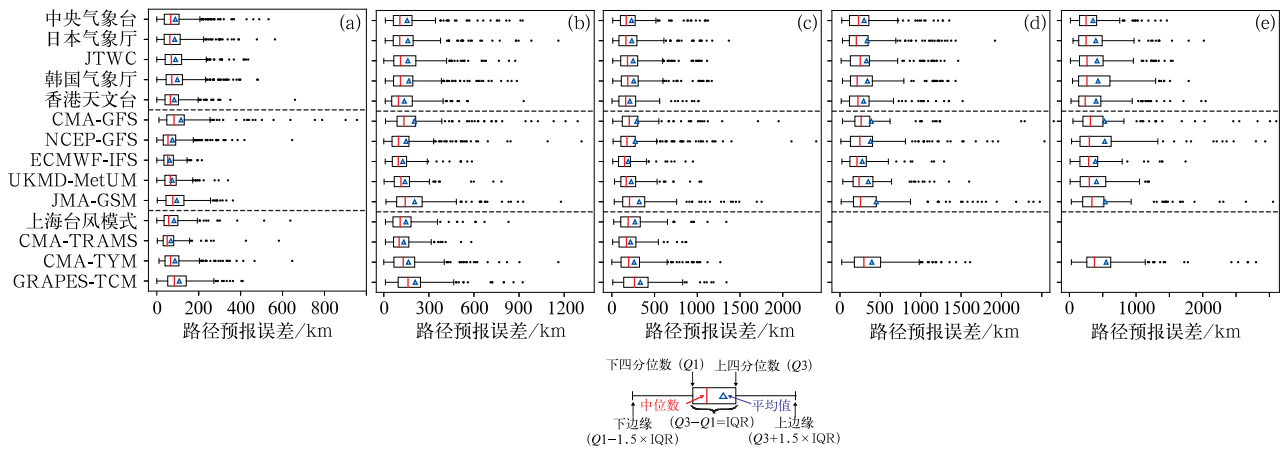
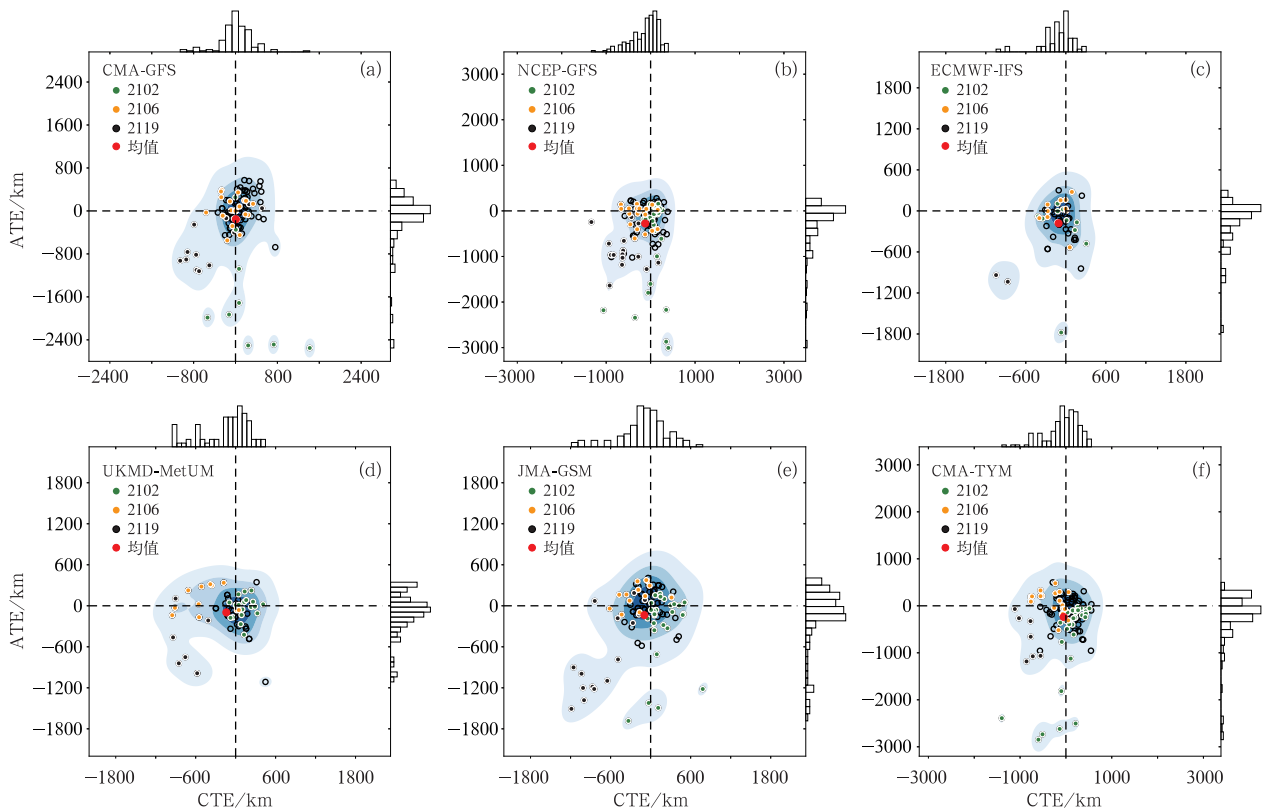


图 3 2021 年官方台风预报机构、全球模式及区域模式(a)24 h、(b)48 h、(c)72 h、(d)96 h 和(e)120 h 路径预报误差箱线图

Fig. 3 Boxplots of track forecast errors by the official typhoon forecast agencies, global models and regional models at (a) 24 h, (b) 48 h, (c) 72 h, (d) 96 h and (e) 120 h lead times in 2021



注:蓝色阴影映射 ATE 和 CTE 双变量核密度估计值,蓝色越深代表核密度估计越大; ATE 和 CTE 的直方图分别位于坐标轴右方及上方。

图 4 2021 年(a~e)全球模式及(f)区域模式的 120 h 预报时效 ATE 和 CTE 联合分布(彩色圆点)

Fig. 4 The joint distribution (colored dot) of the ATE and CTE of (a~e) global models and (f) regional model at 120 h lead time in 2021

ATE)和垂直于台风实际移动方向误差(cross track error,CTE)的联合分布图(圆点离原点越近,代表

路径预报偏差越小)。ATE 正(负)值代表预报路径较实况偏快(慢),CTE 正(负)值代表预报路径较实

况偏右(左)。2021年,各客观预报方法120 h预报时效路径预报的特征为:路径预报较实况偏慢的样本数普遍大于偏快的样本数,且路径预报较实况偏左的样本数大于偏右的样本数。路径预报偏差大的样本主要源于2102号超强台风舒力基和2119号台风南川。除UKMD-MetUM外,CMA-GFS、NCEP-GFS、ECMWF-IFS、JMA-GSM和CMA-TYM对“舒力基”的路径预报普遍较实况偏慢。各客观预报方法对“南川”的路径预报较实况偏慢且偏左。此外,除CMA-GFS外,NCEP-GFS、ECMWF-IFS、UKMD-MetUM、JMA-GSM和CMA-TYM对2106号强台风烟花的路径预报普遍较实况偏左。

3.1.2 同样本评定

表4分别列出了2021年官方台风预报机构、全球模式及区域模式的路径预报同样本平均误差和样本数。

官方台风预报机构的同样本评定表明:24 h路

径预报平均误差最小的为JTWC(75.5 km),此外中央气象台、日本气象厅、香港天文台的24 h路径预报平均误差在80 km以内。48、72和96 h路径预报平均误差较小的为香港天文台(125.7、185.7和213.3 km)和日本气象厅(126.0、184.9和213.5 km)。120 h路径预报平均误差最小的为香港天文台(231.6 km),其次为中央气象台(239.0 km)和日本气象厅(239.9 km)。

全球模式的同样本评定表明:3 d以内路径预报平均误差最小的为NCEP-GFS,其次为ECMWF-IFS。72~96 h和132 h路径预报平均误差最小的为ECMWF-IFS。108 h路径预报平均误差最小的是CMA-GFS,其次为ECMWF-IFS。120 h路径预报平均误差最小的为UKMD-MetUM。

区域模式的同样本评定表明:各预报时效(12~72 h)路径预报平均误差最小的为CMA-TRAMS(47.5、67.8、87.5、117.6、155.2和203.4 km)。

表 4 2021 年官方台风预报机构、全球模式及区域模式各预报时效的路径预报同样本平均误差
Table 4 Homogeneous mean errors of track forecasts by the official typhoon forecast agencies, global models and regional models in 2021

不同方法	预报时效/h											
	12	24	36	48	60	72	84	96	108	120	132	
主 观 预 报	同样本数/个	—	278	—	232	—	179	—	113	—	80	—
	中央气象台/km	—	77.6	—	134.4	—	195.9	—	219.4	—	239.0	—
	日本气象厅/km		77.3		126.0		184.9		213.5		239.9	
	JTWC/km		75.5		130.5		192.5		225.8		245.3	
	韩国气象厅/km		87.8		143.2		203.3		221.9		245.9	
	香港天文台/km		78.9		125.7		185.7		213.3		231.6	
全 球 模 式	同样本数/个	87	82	74	67	55	50	43	35	29	28	31
	CMA-GFS/km	61.2	88.5	121.1	178.3	217.9	262.9	302.2	317.4	336.8	421.8	—
	NCEP-GFS/km	36.9	53.4	78.5	121.6	153.7	213.1	279.2	343.0	409.4	554.2	483.0
	ECMWF-IFS/km	37.7	55.7	85.5	129.4	160.5	212.7	266.8	310.1	351.3	416.3	373.5
	UKMD-MetUM/km	40.3	62.3	90.8	140.6	174.1	216.7	271.0	346.9	368.1	389.9	435.0
	JMA-GSM/km	40.2	72.0	111.3	165.6	199.5	248.8	299.0	324.3	355.0	446.9	504.6
区 域 模 式	同样本数/个	151	142	131	113	105	96	—	—	—	—	—
	上海台风模式/km	60.9	83.5	104.2	140.0	189.9	244.8	—	—	—	—	—
	CMA-TRAMS/km	47.5	67.8	87.5	117.6	155.2	203.4	—	—	—	—	—
	CMA-TYM/km	59.7	82.9	113.7	147.6	199.7	259.3	—	—	—	—	—
	GRAPES-TCM/km	79.4	108.7	152.8	209.5	273.7	328.8	—	—	—	—	—

注:“—”表示该预报方法在该预报时效没有同样本误差数据。

3.2 集合预报误差

集合平均误差和集合离散度是反映集合预报系统预报能力的重要指标。一个好的集合预报系统不仅要有小的预报误差,还要有合适的集合离散度,集合离散度不宜太小或太大,其大小总体上应与预报

误差的大小相当(王晨稀,2014)。

图5a(非同样本)和图5b(同样本)为6个集合预报系统的集合平均路径预报误差。各集合预报系统的集合平均路径预报误差随预报时效的增长而逐渐加大,JMA-GEPS、UKMO-EPS和MSC-CENS各预报时次的误差较大,ECMWF-IFS、NCEP-GFS

和 STI-TEDAPS 的误差较小,其中 ECMWF-IFS、NCEP-GFS 的误差更小(24、48、72、96 和 120 h 预报时效的同样本集合平均路径误差分别在 75、150、250、330、400 km 以内)。

图 6 为 6 个集合预报系统的集合平均路径预报误差和集合离散度双向分位分析图(24~120 h 预

报时效)。2021 年 6 个集合预报系统的全年路径预报特点如下:以 ECMWF-EPS(图 6a)、JMA-GEPS(图 6b)、UKMO-EPS(图 6d)和 MSC-CENS(图 6e)为代表的集合预报系统,随着预报时效的递增,其集合离散度和集合平均路径误差的中位数基本相当。对于 NCEP-GEFS(图 5c),各预报时效的集合离散

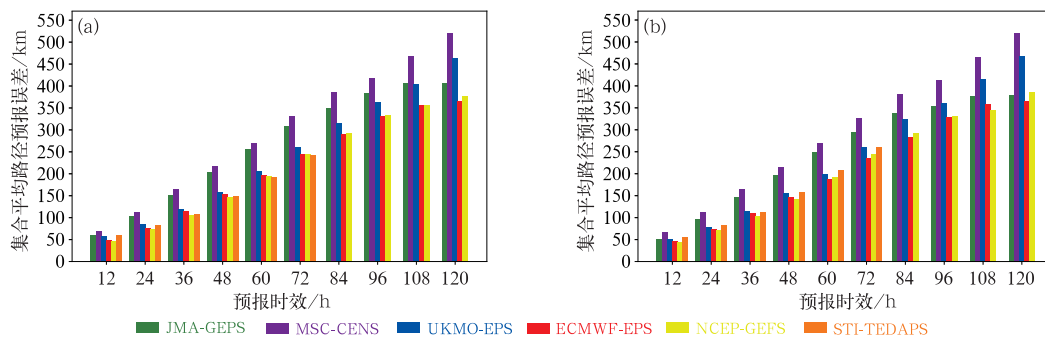


图 5 2021 年集合预报系统各预报时效的集合平均路径预报误差

(a)非同样本比较,(b)同样本比较

Fig. 5 Ensemble mean track forecast errors at each lead time by the ensemble prediction systems in 2021

(a) non-homogeneous compression, (b) homogeneous compression

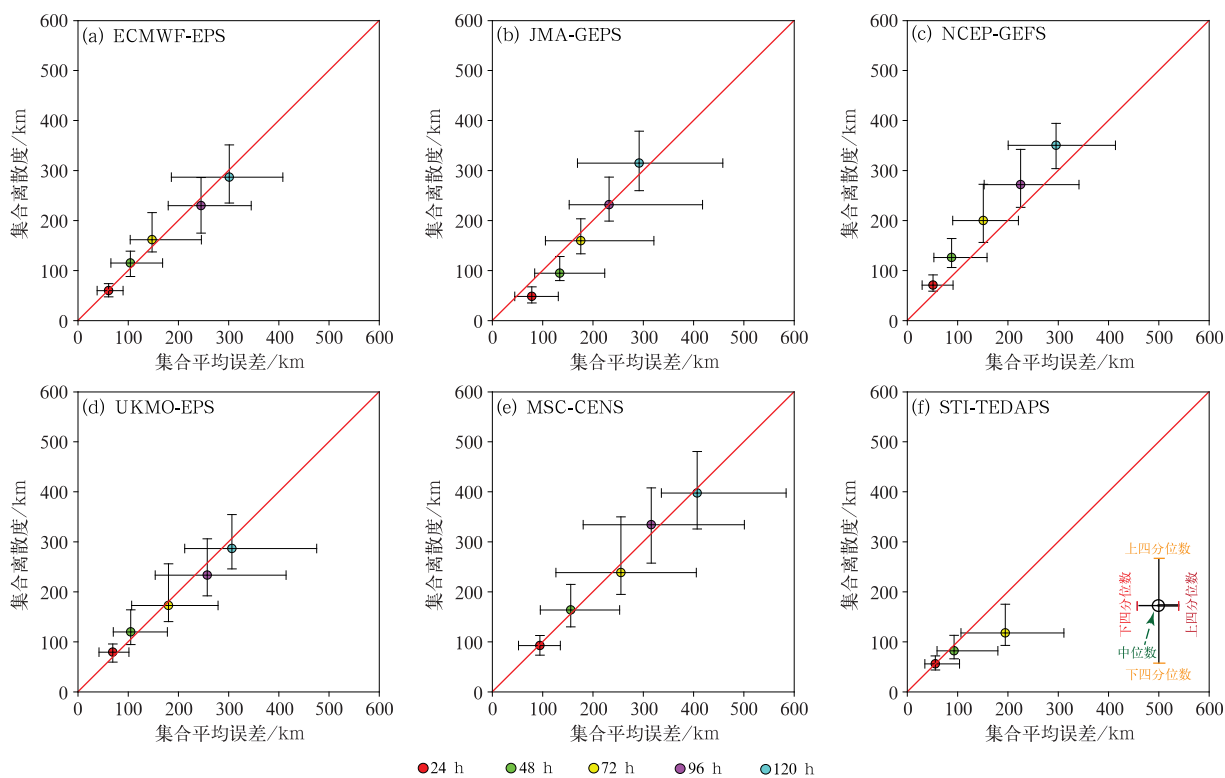


图 6 2021 年台风集合预报系统各预报时效的集合平均路径预报误差和集合离散度双向分位分析图

Fig. 6 Bi-directional quantitative analysis chart of ensemble mean track forecast errors and ensemble spread

at each lead time by the typhoon ensemble prediction systems in 2021

度中位数大于集合平均路径误差中位数。对于 STI-TEDAPS(图 5f),随着预报时效的增加,集合平均路径误差的中位数逐渐超过集合离散度的中位数。

当集合平均预报误差大于(小于)集合离散度时,集合预报系统低估(高估)了预报的不确定性。因此整体而言,ECMWF-EPS、JMA-GEPS、UKMO-EPS 和 MSC-CENS 较好地表达了 2021 年西北太平洋台风路径预报的不确定性,而 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,STI-TEDAPS 则倾向于低估了台风路径预报的不确定性。

4 台风强度预报误差

4.1 非同样本评定

2021 年官方台风预报机构、全球模式及区域模

式强度(指近台风中心地面最大风速,下同)预报的平均绝对误差(mean absolute error, MAE)和样本数列于表 5。官方台风预报机构的强度预报 MAE 普遍小于全球模式及区域模式。5 个官方台风预报机构全年 24、48、72、96 和 120 h 强度预报 MAE 区间为 4.4~4.9、5.3~6.3、5.2~6.8、5.6~6.4 和 5.5~6.1 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。其中,各预报时效强度预报 MAE 最小的机构均为中央气象台。中央气象台、日本气象厅、JTWC、韩国气象厅和香港天文台的 24 h 强度预报无偏差的样本占比分别为 22%、13%、9%、8%、17%,预报偏强的样本占比分别为 41%、47%、60%、42%、36%,预报偏弱的样本占比分别为 37%、41%、31%、50%、46%。全球模式中,24、48、72、96 和 120 h 预报时效 MAE 最小的均为 NCEP-GFS(5.4、6.2、6.9、6.6 和 6.8 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)。区域模式中,CMA-TYM 各预报时效的 MAE 最小。

进一步分析官方台风预报机构、全球模式及区域模式的历年强度预报 MAE(图 7)。各主观预报

表 5 2021 年官方台风预报机构、全球模式及区域模式各预报时效的样本数和强度预报平均绝对误差
Table 5 Sample sizes and mean absolute errors of intensity forecasts by the official typhoon forecast agencies, global models, and regional models at each lead times in 2021

不同方法	预报时效/h										
	24		48		72		96		120		
	样本数 /个	MAE/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	样本数 /个	MAE/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	样本数 /个	MAE/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	样本数 /个	MAE/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	样本数 /个	MAE/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	
主 观 预 报	中央气象台	383	4.4	290	5.3	223	5.2	164	5.6	114	5.5
	日本气象厅	403	4.4	291	5.7	215	6.3	131	5.7	91	6.1
	JTWC	399	4.8	328	5.5	258	6.0	187	6.4	137	5.9
	韩国气象厅	376	4.9	301	5.8	239	6.1	182	5.8	135	5.6
	香港天文台	326	4.9	264	6.3	204	6.8	154	6.1	113	5.8
全 球 模 式	CMA-GFS	269	10.0	222	10.1	178	9.6	141	8.6	114	8.1
	NCEP-GFS	360	5.4	298	6.2	243	6.9	187	6.6	147	6.8
	ECMWF-IFS	177	7.5	139	7.6	109	8.4	79	7.9	61	7.4
	UKMD-MetUM	187	8.1	154	9.7	117	10.1	86	9.4	65	8.3
	JMA-GSM	299	5.5	245	8.3	198	9.7	157	11.6	117	13.9
区 域 模 式	上海台风模式	176	7.6	140	7.5	115	7.4	—	—	—	—
	CMA-TRAMS	181	5.8	149	8.2	119	8.6	—	—	—	—
	CMA-TYM	377	4.8	319	6.0	260	6.5	197	6.8	150	7.9
	GRAPES-TCM	167	5.4	142	7.4	119	8.5	—	—	—	—

注:“—”表示该预报方法在该预报时效没有预报数据。

和客观预报方法的强度预报 MAE 在 2012—2017 年有了一定程度的减小,但在 2018—2021 年没有呈现减小的趋势。2018—2021 年,官方台风预报机构的 24、48 和 72 h 强度预报 MAE 大体在 4~5、5~7、5~8 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 左右,其中各预报时效都位列第一梯队的为中央气象台。全球模式及区域模式中,强度预

报 MAE 位列第一梯队的为 CMA-TYM 和 NCEP-GFS。

图 8 为 2021 年官方台风预报机构、全球模式及区域模式 24、48、72、96 和 120 h 强度预报偏差箱线图。各主客观预报方法的强度预报共性特征为:各预报时效的最大偏弱幅度普遍大于最大偏强幅度,

强度预报异常偏弱(预报偏差 $<Q1 - 1.5IQR$)的样本数大于强度预报异常偏强(预报偏差 $>Q3 + 1.5IQR$)的样本数。其中,NCEP-GFS 的 96 h 强度

预报极端偏弱 $59 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。对快速增强阶段的台风强度预报能力不足是客观预报方法强度预报极端偏弱的主要原因。

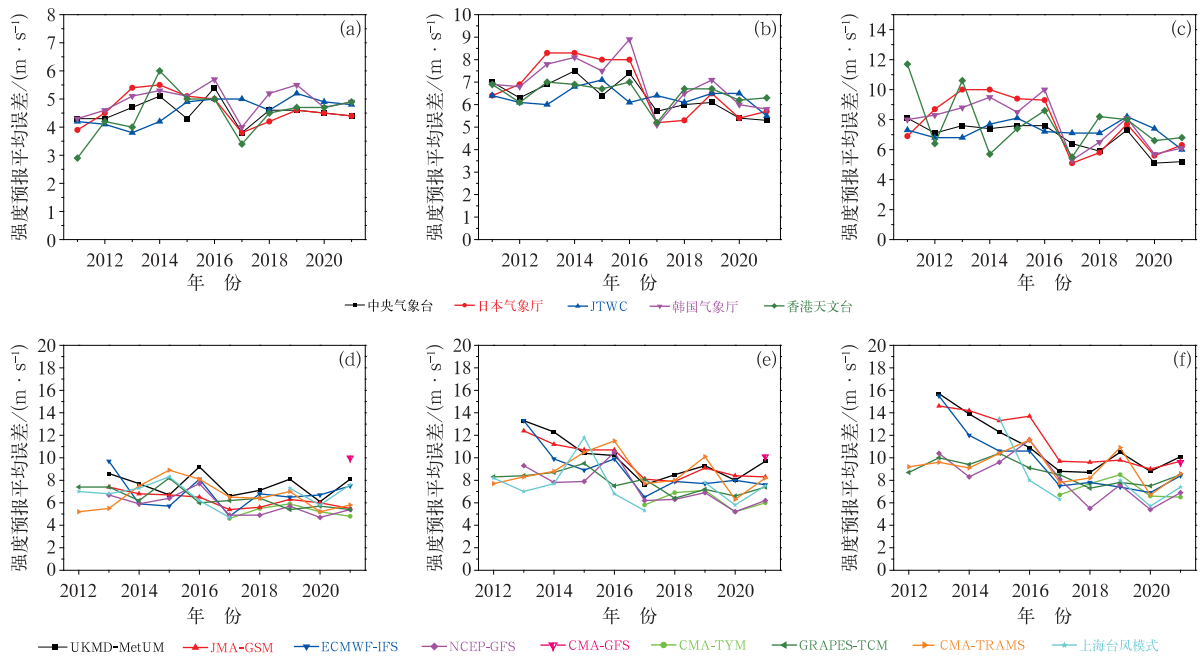


图 7 历年(a,d)24 h、(b,e)48 h 和(c,f)72 h 台风强度预报平均绝对误差
(a,b,c)官方台风预报机构,(d,e,f)全球模式及区域模式

Fig. 7 Mean absolute errors of typhoon intensity forecasts over the years at
(a, d) 24 h, (b, e) 48 h, and (c, f) 72 h lead times by (a, b, c) official typhoon
forecast agencies, (d, e, f) global models and regional models

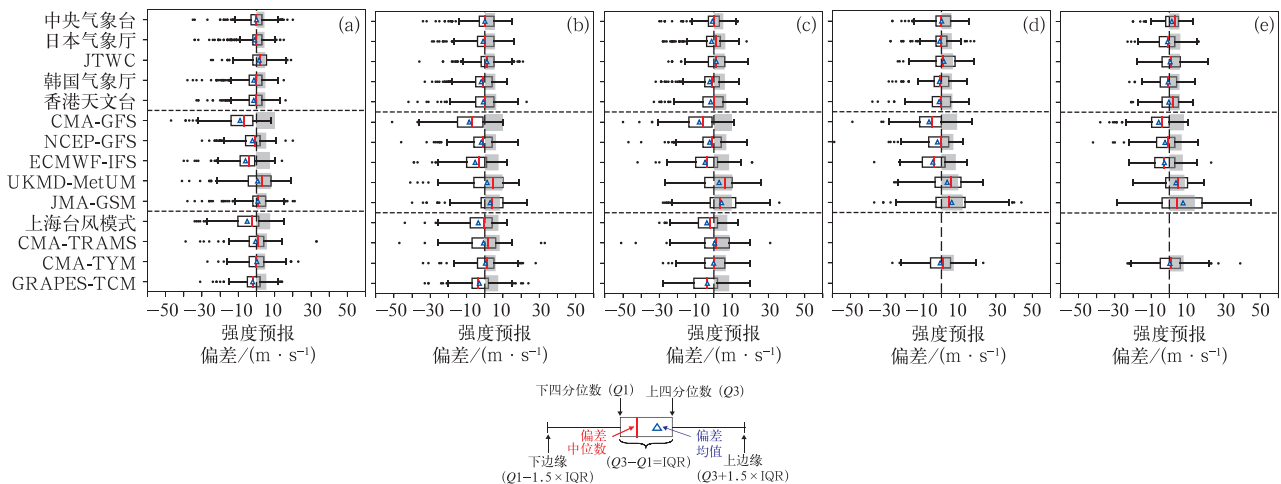


图 8 2021 年官方台风预报机构、全球模式及区域模式(a)24 h、
(b)48 h、(c)72 h、(d)96 h 和(e)120 h 强度预报偏差箱线图

Fig. 8 Boxplots of intensity forecast biases by the official typhoon forecast agencies,
global models and regional models at (a) 24 h, (b) 48 h, (c) 72 h, (d) 96 h and
(e) 120 h lead times in 2021

进一步分析全年强度预报偏差中位数(图 8),若强度预报偏差中位数为负值(正值),表明预报偏弱(偏强)的概率大。全球模式及区域模式各预报时效的强度预报系统性偏差特征如下:以 CMA-GFS、NCEP-GFS、ECMWF-IFS 为代表的全球模式,以及以上海台风模式和 GRAPES-TCM 为代表的区域模式,强度预报偏弱(即低估台风强度)的概率大。以 UKMD-MetUM 和 JMA-GSM 为代表的全球模式和以 CMA-TRAMS 为代表的区域模式,强度预报偏强(即高估台风强度)的概率大。CMA-TYM 系统性偏差不明显。

4.2 同样本评定

强度预报误差同样本评定(表 6)表明:官方台

风预报机构中,各预报时效的强度预报 MAE 都较小的为中央气象台。全球模式中,24、48、72 和 96 h 强度预报 MAE 最小的为 NCEP-GFS(5.8、5.9、5.6、6.4 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$),120 h 强度预报 MAE 最小的为 CMA-GFS(5.2 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)。此外,JMA-GSM 96 h 和 120 h 预报时效的 MAE 明显大于其他 4 个全球模式。将 CMA-GFS 和 NCEP-GFS 的 120 h 强度预报进行同样本比较(100 个同样本数),CMA-GFS 强度预报 MAE 较小(6.9 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$),较 NCEP-GFS (7.3 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)小 0.4 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$,CMA-GFS 的胜出率(预报误差小的样本数占总同样本数的百分比)较 NCEP-GFS 的胜出率高 3%。区域模式中,CMA-TYM 的 24、48 和 72 h 强度预报 MAE 最小。

表 6 2021 年官方台风预报机构、全球模式及区域模式各预报时效的强度预报同样本平均绝对误差
Table 6 Homogeneous mean absolute errors of intensity forecasts at each lead time by the official typhoon forecast agencies, global models and regional models in 2021

不同方法	预报时效/h										
	24		48		72		96		120		
	同样本数/个	MAE/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	同样本数/个	MAE/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	同样本数/个	MAE/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	同样本数/个	MAE/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	同样本数/个	MAE/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	
主观 预报	中央气象台	271	4.8	214	5.8	165	5.4	101	5.5	73	5.4
	日本气象厅		4.7		5.9		6.2		6.1		6.9
	JTWC		4.9		5.5		5.8		6.3		5.9
	韩国气象厅		5.4		6.1		6.4		6.2		6.5
	香港天文台		4.9		6.3		6.5		5.4		6.2
全球 模式	CMA-GFS	82	10.4	67	9.8	50	8.1	35	8.0	28	5.2
	NCEP-GFS		5.8		5.9		5.6		6.4		6.4
	ECMWF-IFS		7.5		8.0		7.8		7.7		6.8
	UKMD-MetUM		8.4		10.3		9.4		7.9		7.4
	JMA-GSM		6.4		9.1		10.5		12.9		15.3
区 域 模 式	上海台风模式	141	7.7	113	8.2	96	7.6	—	—	—	—
	CMA-TRAMS		5.9		9.1		9.1				
	CMA-TYM		4.8		5.9		6.4				
	GRAPES-TCM		5.7		7.3		8.1				

注:“—”表示该预报方法在该预报时效没有同样本数据。

5 台风登陆点预报误差

2021 年共有 6 个台风登陆我国,登陆时的等级包含 TS、STS 和 TY。其中“卢碧”登陆我国 3 次,“烟花”登陆我国 2 次,“小熊”“查帕卡”“狮子山”“圆规”各登陆我国 1 次。

表 7 为 2021 年官方台风预报机构、全球模式及区域模式在台风登陆前 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,分析可见:各主观预报和客观预报方法的 24 h 最大登陆误差最小的为中央气象台(57.6 km),此外中央气象台对“烟花”在浙江平湖(第二次登陆)的 24 h 登陆点预报误差仅为 3.1 km。官方台风预报机构对“烟花”在浙江舟山(首次登陆)的登陆点预报普遍优于区域模式和全球模式。各主观预报和客观预报方法普遍对“小熊”在海南陵水、“烟花”在浙江平湖、“查帕卡”在广东阳江、“狮子山”和“圆规”在海南琼海的登陆点预报较好。

表 7 2021 年官方台风预报机构、全球模式及区域模式的 24 h 内登陆点预报误差(单位:km)
Table 7 The landfall point forecast errors (unit: km) at 24 h lead time by the official typhoon forecast agencies, global models, and regional models in 2021

台风	名称(编号)	小熊 (2104)	烟花 (2106)	烟花 (2106)	查帕卡 (2107)	卢碧 (2109)	卢碧 (2109)	卢碧 (2109)	狮子山 (2117)	圆规 (2118)
	登陆等级	TS	TY	STS	TY	TS	TS	TS	TS	STS
	登陆点	海南陵水	浙江舟山	浙江平湖	广东阳江	广东汕头	福建东山	台湾新竹	海南琼海	海南琼海
主观 预报	中央气象台	51.7	57.6	3.1	13.7	28.8	47.3	18.7	43.9	14.6
	日本气象厅	41.3	43.9	19.6	2.2	53.5	69.9	59.4	41.0	113.5
	JTWC	35.7	79.7	2.2	7.9	16.8	33.4	36.5	42.4	29.5
	韩国气象厅	*	58.9	37.3	54.0	5.8	23.2	72.5	43.8	29.5
	香港天文台	63.1	54.1	13.7	10.5	83.7	103.6	66.8	14.6	45.8
全球 模式	NCEP-GFS	18.7	122.5	2.2	54.0	119.3	140.0	96.3	15.6	36.7
	ECMWF-IFS	*	121.0	2.2	11.2	86.2	106.2	78.8	47.1	19.0
	CMA-GFS	*	*	*	*	*	*	*	93.8	7.6
	UKMD-MetUM	9.1	115.6	12.4	0	79.1	98.6	34.5	14.9	80.3
	JMA-GSM	15.9	109.5	4.4	39.7	49.8	66.3	71.5	53.5	5.4
区域 模式	CMA-TRAMS	69.1	118.8	7.3	22.6	60.0	77.6	40.3	35.1	2.2
	CMA-TYM	*	135.4	7.6	23.4	124.3	145.0	104.5	0	72.9
	GRAPES-TCM	*	38.9	111.2	11.8	120.5	141.3	122.7	48.8	#
	上海台风模式	*	117.4	9.6	*	94.7	114.9	144.3	15.7	24.3

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

6 结 论

本文对 2021 年西北太平洋及南海台风的定位定强精度及路径、强度和登陆点预报精度进行了评定,主要结论如下:

(1)2021 年,全年平均定位和定强误差最小的为中央气象台,年平均定位误差(19.7 km)较 2020 年(22.7 km)减少 13%,年平均定强误差(1.4 m · s⁻¹)较 2020 年(1.2 m · s⁻¹)略增大。

(2)近十年(2012—2021 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。2021 年,官方台风预报机构、全球模式及区域模式的全年路径预报平均误差较 2020 年有所增大,区域模式中 CMA-TRAMS 各预报时效(12~72 h)路径预报平均误差最小。全球模式和区域模式 120 h 极端路径误差主要由于对 2102 号超强台风舒力基的路径预报普遍较实况偏慢,以及 2119 号台风南川的路径预报较实况偏慢且偏左造成的。

(3)ECMWF-IFS、JMA-GFS、UKMO-IFS 和 MSC-CENS 较好地表达了 2021 年台风路径预报的不确定性,而 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,STI-TEDAPS 则倾向于低估了台风路径预报的不确定性。

(4)各主观预报和客观预报方法的强度预报平

均绝对误差在 2012—2017 年有了一定程度的减小,但在 2018—2021 年没有呈现减小的趋势。2021 年,全球模式 NCEP-GFS 的 24、48、72 和 96 h 强度预报 MAE 最小;区域模式 CMA-TYM 的 24、48 和 72 h 强度预报 MAE 最小。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,对快速增强阶段台风强度预报能力不足是预报极端偏弱的主要原因。CMA-GFS、NCEP-GFS、ECMWF-IFS、上海台风模式和 GRAPES-TCM 低估台风强度的概率大,而 UKMD-MetUM、JMA-GSM、CMA-TRAMS 高估台风强度的概率大,CMA-TYM 强度预报系统性偏差不明显。

(5)官方台风预报机构对台风烟花在浙江舟山的登陆点预报普遍优于区域模式和全球模式。各主观预报和客观预报方法普遍对“小熊”在海南陵水、“烟花”在浙江平湖、“查帕卡”在广东阳江、“狮子山”和“圆规”在海南琼海的登陆点预报较好。

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).
- 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).
- 高歌, 黄大鹏, 赵珊珊, 2019. 基于信息扩散方法的中国台风灾害年月尺度风险评估[J]. 气象, 45(11):1600-1610. Gao G, Huang D P, Zhao S S, 2019. Annual and monthly risk assessment of typhoon disasters in China based on the information diffusion method[J]. Meteor Mon, 45(11):1600-1610(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).
- 刘思琦, 林文明, 王志雄, 等, 2021. 基于 HY-2B 散射计的热带气旋定位定强研究[J]. 海洋学报, 43(11):146-156. Liu S Q, Lin W M, Wang Z X, et al, 2021. Determination of tropical cyclone location and intensity using HY-2B scatterometer data[J]. Haiyang Xuebao, 43(11):146-156(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).
- 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).
- 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).
- 全国气象防灾减灾标准化技术委员会, 2019. 天气预报检验 台风预报: GB/T 38308—2019 [S]. 北京: 中国标准出版社. National Meteorologica Disaster Prevention and Mitigation Standardization Technical Committee, 2019. Weather forecast verification-typhoon forecast: GB/T 38308—2019 [S]. Beijing: Standards Press of China(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).
- 王晨稀, 2014. “梅花”台风路径与强度的集合预报[J]. 热带海洋学报, 33(6):48-60. Wang C X, 2014. Ensemble prediction of Typhoon Muifa's track and intensity[J]. J Trop Oceanogr, 33(6):48-60(in Chinese).
- 王志烈, 李多武, 1981. 台风探测和业务定位的误差分析[J]. 气象, 7(8):9-10, 8. Wang Z L, Li D W, 1981. Analysis of position error of typhoon detection and operational forecast[J]. Meteor Mon, 7(8):9-10, 8(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, 2022. 热带气旋预报检验指标数据的可视化分析方法: 中国, CN202210374246. X[P]. 2022-04-11. Yang M Q, Chen G M, 2022. Visualization analysis method for verification index data of tropical cyclone forecast: CN202210374246. X[P]. 2022-04-11(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).
- Cangialosi J P, 2022. National Hurricane Center Forecast verification report: 2021 hurricane season. National Hurricane Center[EB/OL]. (2022-04-25). https://www.nhc.noaa.gov/verification/pdfs/Verification_2021.pdf.
- 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-4DEnVar) data assimilations[J]. Quart J Roy Meteor Soc, 149(753):1138-1164.
- IPCC, 2022. Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment

- Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change[M]. Cambridge:Cambridge University Press.
- Lei X T, Fong C, Malano V B, et al, 2019. Overview on the progress of working group on meteorology of ESCAP/WMO Typhoon Committee in the recent 10 years[J]. *Trop Cyclone Res Rev*, 8(2):84-94.
- 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.
- Muroi C, Sato N, 1994. Intercomparison of tropical cyclone track forecast by ECMWF, UKMO and JMA operational global models[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.
- Tan Y, Zhang X, Xu X L, et al, 2022. Improvements in the GRAPES-TCM and the forecast performance analysis in 2019[J]. *Front Earth Sci*, 16(1):144-157.
- Tsuyuki T, Sakai R, Mino H, 2002. The WGNE intercomparison of typhoon track forecasts from operational global models for 1991-2000[J]. *WMO Bull*, 5(3):253-257.
- Yamaguchi H, Adachi Y, Hirahara S, et al, 2022. Upgrade of JMA's global ensemble prediction system [R/OL]. (2022-03-15) [2023-02-28]. https://wgne.net/bluebook/uploads/2022/docs/06_Yamaguchi_Haruki_JMAGEPS2203.pdf.
- Yamaguchi M, Ishida J, Sato H, et al, 2017. WGNE intercomparison of tropical cyclone forecasts by operational NWP models: a quarter century and beyond[J]. *Bull Amer Meteor Soc*, 98(11):2337-2349.
- Ying M, Zhang W, Yu H, et al, 2014. An overview of the China Meteorological Administration tropical cyclone database[J]. *J Atmos Oceanic Technol*, 31(2):287-301.
- 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, 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.
- Zhou X Q, Juang H M H, 2023. A model instability issue in the NCEP global forecast system version 16 and potential solutions [EB/OL]. (2023-01-30) [2023-02-28]. <https://doi.org/10.5194/egusphere-2022-1235>.

(本文责编:何晓欢)