

杨国杰,沙天阳,程正泉,2018. 2009—2015年ECMWF热带气旋集合预报的检验及分析[J]. 气象, 44(2): 277-283.

2009—2015年ECMWF热带气旋 集合预报的检验及分析*

杨国杰 沙天阳 程正泉

广东省气象台, 广州 510640

提 要: 本文从四个方面检验分析了ECMWF 2009—2015年西北太平洋热带气旋集合平均预报性能。结果表明:集合预报对路径的预测能力逐年提高,对强度预报整体偏弱。随着热带气旋强度增强,集合预报对移速和移向的预测能力提高,而移向预报偏左、移速预报偏慢、强度预测偏弱的现象较明显。将影响热带气旋的引导气流分为偏强、中等、偏弱三类,引导气流偏弱时热带气旋移动偏慢,因此移向预报的不确定性大;而引导气流偏强时热带气旋移向明确,只是移速预报不稳定。进入南海的三类路径热带气旋,集合预报对西行、西北行两类的移速、移向预报效果较好,而西行后北折的预报较差,在热带气旋北折前,移向预报发散度很大,向北转折后移向趋于稳定,移速预报的误差相对较大。这几种情形的检验结果,在热带气旋集合预报的业务应用中值得注意。

关键词: 热带气旋,欧洲中期天气预报中心(ECMWF),集合预报,检验

中图分类号: P456

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2018.02.007

Verification and Analysis on Tropical Cyclone Ensemble Forecast of European Centre for Medium-Range Weather Forecasts from 2009 to 2015

YANG Guojie SHA Tianyang CHENG Zhengquan

Guangdong Meteorological Observatory, Guangzhou 510640

Abstract: The verification and analysis on tropical cyclone (TC) ensemble forecast of European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) over western North Pacific in 2009—2015 are given from four aspects. The results show that the capability of ensemble forecast on TC tracks has been improving annually, but the intensity forecasting is always weak. The stronger the TCs are, the more accurate the ensemble forecasts of TC moving speed and moving direction are, though the forecasted speed is slow and the forecasted direction turning leftwards exists, whereas the forecasted intensity is weaker. On the other hand, the steering flow of TCs is classified into three grades. When the steering flow is weak, the TC moves slowly, and the direction forecasting is uncertain; when the steering flow is strong, the TC moving direction forecasting is reliable, but the speed forecasting is not good enough. As to the TCs over South China Sea classified according to three different types of tracks, the speed and direction ensemble forecasting errors would be small in westerly and northwesterly tracks, but would be large in westerly to northerly tracks. For the TC with westerly to northerly tracks, the direction forecasting has large spread before turning northerly, while the moving direction would be stable after turning northerly.

Key words: tropical cyclone (TC), European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF), ensemble forecast, examination

* 国家重点研发计划重点专项(2017YFC1404700)、中国气象局预报员专项(CMAYBY2016-051)、国家科技支撑计划课题(2015BAK11B01)、中国气象局创新团队(CMACXTD001-3)和广东省气象局科技创新团队(201504)共同资助

2017年3月21日收稿; 2017年8月15日收修定稿

第一作者:杨国杰,从事台风海洋预报和研究工作. Email: gjyang@grmc.gov.cn

引言

随着数值模式能力的不断提高,热带气旋预报从过去参考经验、动力统计等方法,发展到现在主要依靠数值预报。近年来,集合预报应用技术日益受到重视(杜钧,2002),在热带气旋业务领域的应用也愈加广泛(张守峰等,2007;涂小萍等,2012;王晨稀,2013;钱奇峰等,2014;沙天阳等,2015;张涵斌等,2015),与之对应的检验分析工作,也是必不可少的组成部分。

不少气象工作者对热带气旋预报技术和方法展开了检验分析。费亮等(1985)对我国台风预报业务进行了评价,认为客观预报方法性能优于综合方法;Elsberry and Peak (1986)、Elsberry and Dobos (1990)和 Elsberry and Carr III (2000)将热带气旋的移向、移速分量分别与实况路径对比,来检验热带气旋的移动预报,并且通过大量的样本,检验分析了集合预报误差与离散度的关系,以此建立优选集合预报算法;Goerss(2007)通过对集合预报误差范围的估计和预测,来提高热带气旋路径预报的准确率;海南省气象台对比分析了 T213 和 ECMWF 数值模式对热带气旋的预报准确率,发现 EC 的预报能力更强(杨昌贤等,2008);上海台风研究所连续多年对西北太平洋热带气旋的主客观预报方法和集合预报进行评定和分析,发现 ECMWF 的业务模式和集合预报效果都最优(汤杰等,2011;陈国民等,2012;2013;2015;2017;陈国民和曹庆,2014);广东省气象台从预报的角度对 2013 年 ECMWF 热带气旋集合预报进行了检验分析,发现了热带气旋强度越强,路径集合预报的性能越好,而强度预报效果越差(杨国杰等,2014)。

在这些研究中,大部分都分析了各种主客观预报的预报能力和预报精度的好坏,或者通过检验分析来改善集合预报算法,然而各种预报方法在什么情况下的预报能力较好,尤其是集合预报的性能如何还涉及不多。已有研究表明,引导气流对热带气旋的移动有很大影响(陈联寿和丁一汇,1979),热带气旋的强度与其路径有很大关系(陈联寿,1985;田永祥和赵远东,1997),这两方面的作用在实际业务中也被预报员普遍接受。本文在常规统计方法的基础上,从不同强度的热带气旋,以及不同强度引导气流影响的热带气旋这两个角度,检验分析集合预报的性能,并关注了南海三种路径热带气旋的预报

效果。

1 资料和方法

本文对 2009—2015 年西北太平洋(包括南海热带气旋)共 146 个热带气旋进行检验分析。实况数据使用中国气象局上海台风研究所整编的台风最佳路径数据集(Ying et al,2014),该数据集包括热带气旋逐 6 h 的中心位置(经、纬度)、中心最大风速、中心最低气压。预报数据是中国气象局下发的 2009—2015 年 ECMWF 热带气旋集合预报资料,集合成员共有 51 个,集合预报算法使用等权平均算法。检验内容包括移向、移速,中心最低气压预报的平均误差和路径预报的距离平均绝对误差。其表达式分别为:

$$e = \frac{1}{n} \sum_i^n (F_i - O_i)$$
$$E = \frac{1}{n} \sum_i^n |F_i - O_i|$$

式中, e 和 E 分别表示平均误差和平均绝对误差, F 表示预报, O 表示实况, i 表示第 i 个样本, n 表示样本总数。

本文从四个角度检验热带气旋集合预报的性能:(1)从总体上对所有预报样本的路径和强度进行统计分析检验。(2)对比实况热带气旋的不同强度等级[热带低压(TD)、热带风暴(TS)、强热带风暴(STS)、台风(TY)、强台风(STY)和超强台风(SuperTY)],分析各时效的集合预报性能。(3)将热带气旋按所受不同强度的引导气流分类,分析集合预报对各类情况的预报能力。参考加权三层引导气流法计算环境平均风场,作为热带气旋的引导气流(钟铨等,1985;王长甫等,1991),引导气流分成偏强、中等、偏弱三类,其中偏强指环境平均风速 $>20 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$,偏弱指环境平均风速 $<10 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$,其余为中等的引导气流。(4)将检验对象中 39 个南海热带气旋分成西行、西北行、西行后北折三类路径(陈联寿和丁一汇,1979),分析这三类路径集合预报的效果差异。文中的检验结果都以实况为标准,分别对之前 0~120 h 的预报进行检验评估。

2 路径预报检验

2.1 总体评价

统计检验 2009—2015 年逐年集合平均路径预

报的距离平均绝对误差(图1),各时效误差基本呈现逐年下降趋势,以36 h(对应实际业务的24 h预报)为例,从2009年接近150 km,到2015年降至80 km以下;线性拟合各预报时效误差,发现随着预报时效延长,误差下降的线性趋势幅度越大(图1中各时效对应的数值)。说明集合预报对热带气旋路径的预报能力不断提高,在长时效预报中提高的幅度更明显。

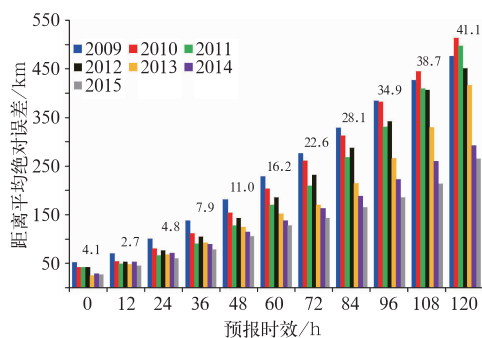
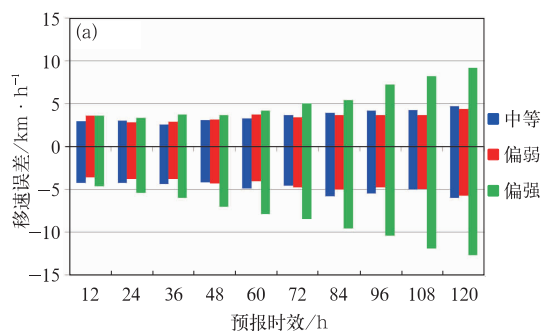


图1 2009—2015年逐年集合平均
路径预报的距离平均绝对误差
(柱状图是距离平均绝对误差,数值
是线性拟合的误差平均降幅)

Fig. 1 The annual mean absolute distance errors of ensemble forecast from 2009 to 2015
(Bars represent mean absolute errors, and the values represent mean decreasing amplitude by linear fitting)



2.2 移向、移速预报误差分析

在实际业务中,距离误差无法直接为预报所参考,预报员更关注与热带气旋路径有关的移向、移速预报,尤其在涉及登陆预报时,因此重点分析集合预报的移向、移速误差。预报经验认为热带气旋的移动和引导气流及热带气旋强度有密切联系,为此将146个西北太平洋热带气旋按不同强度引导气流、不同强度热带气旋进行分类检验,并对其中的39个南海热带气旋分类检验。

2.2.1 不同强度引导气流

将2009—2015年热带气旋所受的引导气流按强度分成偏强、中等、偏弱三类,分析集合平均预报对不同强度引导气流影响下热带气旋移向、移速的误差(图2)。

当引导气流偏强时移速预报误差较大,随时效延长误差增长的趋势最快,与移速预报不同,强引导气流的移向预报误差最小,弱引导气流的误差最大,误差在72 h后有缓慢增大趋势。这可能是由于引导气流偏弱时,热带气旋移动较缓慢,移向不确定性较大,以致移向误差较大,移速误差较小;而引导气流偏强时,热带气旋移速往往较快,移向较明确,因此其移速误差较大,移向误差较小。

表1给出了三种引导气流影响下,移速预报偏快(误差 >0)和偏慢(误差 <0)的平均误差样本数比

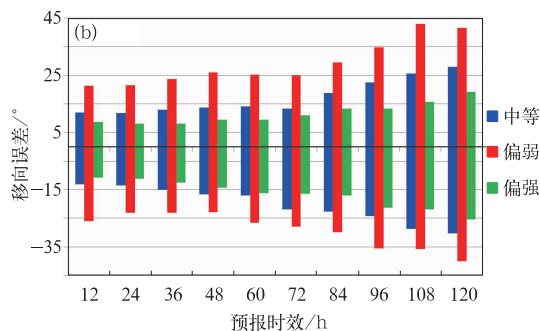


图2 2009—2015年不同强度引导气流影响下热带气旋
集合移速和移向预报的平均误差

(a) 移速误差(误差 >0 表示移速预报偏快, <0 表示偏慢),

(b) 移向误差(误差 >0 表示移向预报偏右, <0 表示偏左)

Fig. 2 The mean speed and direction errors of ensemble forecast under the influence of different types of steering flow from 2009 to 2015
(a) speed errors (error >0 represents forecasting too fast, and error <0 represents forecasting too slow),
(b) direction errors (error >0 represents forecasting rightwards, and error <0 represents forecasting leftwards)

表 1 2009—2015 年不同强度引导气流影响下集合平均预报的平均误差样本数比值
Table 1 The ratio of mean error samples of ensemble forecast under the influence of different types of steering flow from 2009 to 2015

引导气流	12 h	24 h	36 h	48 h	60 h	72 h	84 h	96 h	108 h	120 h
中等	0.91 0.98	0.75 0.97	0.78 0.96	0.72 0.94	0.62 0.88	0.65 0.97	0.63 0.84	0.67 0.85	0.64 0.85	0.54 0.97
偏弱	0.95 1.05	0.90 0.96	0.86 0.99	0.98 1.06	0.89 1.18	1.05 0.88	1.08 0.93	1.01 0.84	0.88 1.07	1.04 1.34
偏强	0.62 0.53	0.50 0.52	0.44 0.58	0.49 0.58	0.47 0.55	0.44 0.58	0.44 0.58	0.39 0.60	0.39 0.52	0.36 0.51

注:左侧数据:移速预报偏快和偏慢的样本数比值,右侧数据:移向预报偏右和偏左的样本数比值。

Note: left values: samples ratio of forecasting speed faster and slower, right values: samples ratio of forecasting direction rightwards and leftwards.

值,及移向预报偏右(误差 >0)和偏左(误差 <0)的平均误差样本数比值。当引导气流偏强时,多数样本移速预报偏慢(比值 <1)、移向预报偏左(比值 <1),说明移速预报偏慢、移向预报左倾的特征较明显;引导气流偏弱时,移速预报偏快和偏慢的样本数比值 ≈ 1 ,移向预报偏右和偏左的样本数比值也 ≈ 1 ,说明移速、移向预报没有明显的偏向性,反映了预报的不确定性更大。

2.2.2 不同强度热带气旋

根据热带气旋不同强度级别,分别对移向、移速集合预报进行检验(图略)。发现移速、移向预报的平均误差随着强度增强而减小,SuperTY 的移速、移向误差最小,表明热带气旋强度越强,集合预报对

其移速、移向预报效果越好。从表 2 移速预报偏快和偏慢的平均误差样本数比值,以及移向预报偏右和偏左的平均误差样本数比值能看出,大部分时效比值 <1 ,反映了各级热带气旋中,移速预报偏慢、移向预报偏向实况左侧的概率较高。

2.2.3 南海热带气旋

南海热带气旋(包括南海发展起来的热带气旋和移入南海的热带气旋)的路径多样,业务上常见的路径可分为西行、西北行、西行后北折三种。对 2009—2015 年的南海热带气旋分类,西行路径 15 个、西北行路径 19 个、西行北折路径 5 个(图 3),分别检验移速、移向预报的误差(图 4)。发现西行北折路径的热带气旋由于路径比较复杂,移速、移向预

表 2 2009—2015 年不同强度热带气旋集合平均预报的平均误差样本数比值
Table 2 The ratio of mean speed and direction error samples of ensemble forecast in different grades of TCs intensity from 2009 to 2015

TC 等级	12 h	24 h	36 h	48 h	60 h	72 h	84 h	96 h	108 h	120 h
TD	0.86 0.56	0.77 0.55	0.74 0.54	0.67 0.57	0.85 0.68	0.94 0.78	0.77 0.68	0.90 1.00	1.00 0.56	0.65 0.59
TS	0.80 0.73	0.57 0.66	0.67 0.67	0.73 0.66	0.64 0.73	0.68 0.64	0.69 0.67	0.64 0.67	0.64 0.67	0.67 0.60
STS	0.89 0.86	0.76 0.78	0.59 0.88	0.58 0.82	0.57 0.75	0.55 0.74	0.60 0.60	0.45 0.53	0.51 0.61	0.48 0.89
TY	0.63 1.00	0.63 1.01	0.58 1.00	0.59 1.01	0.63 1.01	0.50 1.01	0.52 1.02	0.57 1.00	0.43 1.02	0.49 1.00
STY	0.79 0.88	0.74 0.84	0.66 0.73	0.74 0.79	0.64 0.70	0.67 0.89	0.66 0.87	0.61 0.76	0.65 0.68	0.57 0.54
SuperTY	0.94 0.96	1.00 0.74	0.79 0.81	0.91 0.86	0.59 0.97	0.83 0.93	0.73 0.84	0.75 0.71	0.58 0.48	0.65 0.50

注:同表 1。

Note: Same as Table 1.

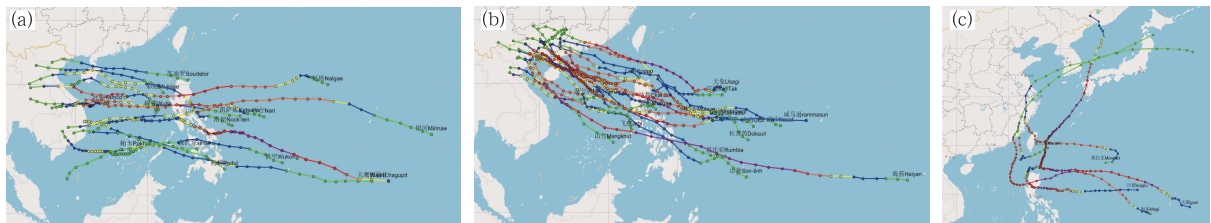


图 3 三类南海热带气旋路径

(a)西行路径, (b)西北行路径, (c)西行北折路径

Fig. 3 Three types of TCs tracks over the South China Sea

(a) westerly tracks, (b) northwesterly tracks, (c) westerly-northerly tracks

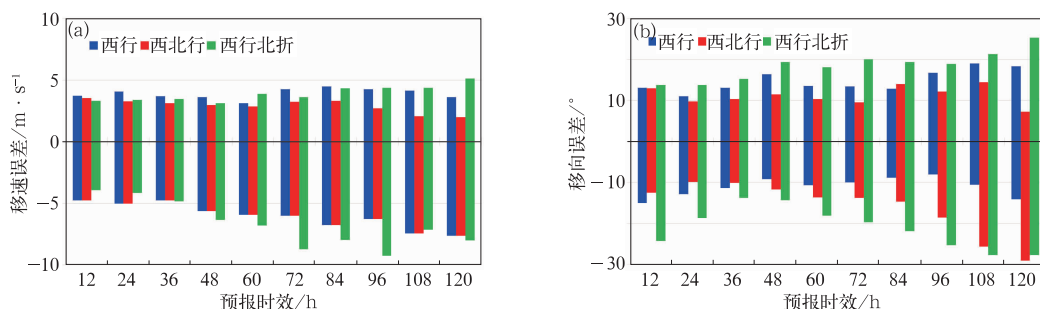


图4 2009—2015年西行、西北行、西行后北折三类路径南海热带气旋集合移速预报(a)和移向预报(b)的平均误差

Fig. 4 The mean speed errors (a) and direction errors (b) of ensemble forecast of three types of TCs tracks over South China Sea from 2009 to 2015

报误差都明显偏大。从样本数分布的比例来看(表略),三类热带气旋的移速预报偏慢、移向预报偏左的机会仍更多。

西行后北折路径的热带气旋预报难度及误差最大,有必要进一步分析误差原因。将热带气旋以转折时刻为界线,分成西行时段和北折时段的预报,得到两个时段0~120 h的移速、移向预报误差(图5),图中-120~0 h和0~120 h分别是西行和北折时段预报。结果显示北折时段的移速误差发散度普遍较大,西行时段的误差发散度较小;相反移向预报在西行时段的误差发散度明显偏大,北折时段的非常小。说明在热带气旋转折之前,无法准确判断热带气旋未来的移动趋势,集合平均移向预报的不确定性非常大,北折后热带气旋路径较稳定,因此移向预报的不确定度明显减小,而移速预报的发散

度有所增加。

3 热带气旋强度预报误差分析

3.1 总体评价

分析2009—2015年西北太平洋146个热带气旋中心最低气压集合平均预报的误差可知(图略),所有时效的气压预报明显偏高,偏高的误差值维持在15~25 hPa,偏低的误差值维持在5~10 hPa,说明对热带气旋的强度预报明显偏弱,而且与路径预报不同,气压预报的误差没有随时效变化的趋势。在中心最低气压预报偏弱(误差>0)和偏强(误差<0)的样本数比值中发现(表略),偏弱的样本数远多于偏强的样本数。反映在各预报时效中,从偏

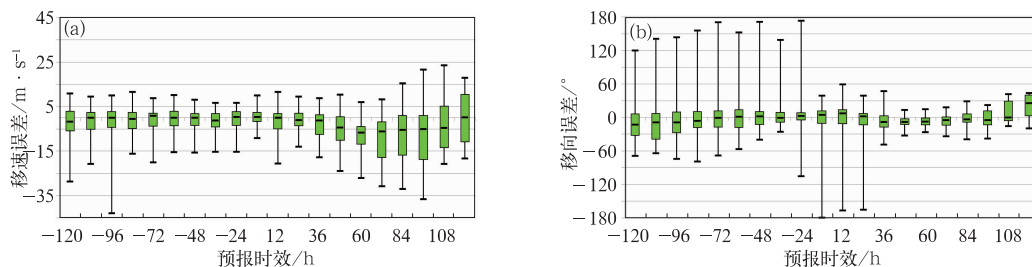


图5 西行北折路径热带气旋转折前后集合移速预报(a)和移向预报(b)的平均误差
(-120~0 h表示转折前西行时段的预报误差,0~120 h表示转折后北折时段的预报误差)

Fig. 5 The mean speed errors (a) and direction errors (b) before and after turning point of TCs with westerly-northerly tracks
(-120~0 h represents the period before turning point, 0~120 h represents the period after turning point)

差程度和发生次数来看,热带气旋强度的集合平均预报偏弱的现象都属于高概率事件。

3.2 不同强度级别

对西北太平洋不同强度热带气旋中心最低气压的集合平均预报进行检验(图 6),发现 STS 及以下级别热带气旋强度预报偏弱和偏强的平均误差值相当;当强度增大到 TY 及以上级别时,偏弱的误差值大于偏强的误差值;随着强度增强偏弱的误差明显增大,SuperTY 的预报误差全部偏弱。

表 3 是对应的中心最低气压预报偏弱和偏强的误差样本数比值。在长时效预报中(96~120 h),STS 及以下级别偏强的平均误差样本数比例较大,主要由于集合预报中一些成员对热带气旋减弱的预测偏慢;TY 及以上级别偏弱的平均误差样本数比例明显大于偏强的误差样本数,且随着强度增强比例越高,当强度达到 SuperTY 时,偏强的平均误差

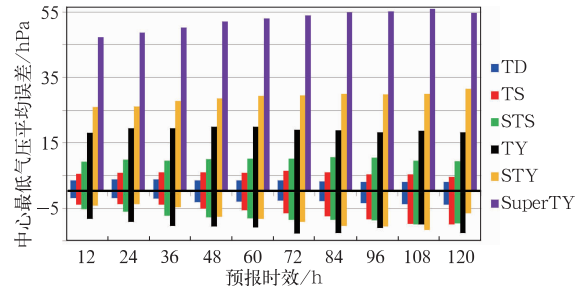


图 6 2009—2015 年不同强度热带气旋中心最低气压集合平均预报的平均误差

Fig. 6 The mean errors of ensemble forecast for the lowest pressure of center in different grades of TC intensity from 2009 to 2015

样本数在所有时效中为 0。说明从偏差程度和次数来看,集合预报对各级热带气旋的强度预测偏弱,随着强度增强预报偏弱的现象越明显,对 SuperTY 的预报始终偏弱。

表 3 2009—2015 年不同强度热带气旋中心最低气压集合平均预报的偏弱和偏强的平均误差样本数比值
Table 3 The ratio of weak and strong mean error samples of ensemble forecast for the lowest pressure of center in different grades of TC intensity from 2009 to 2015

TC 等级	12 h	24 h	36 h	48 h	60 h	72 h	84 h	96 h	108 h	120 h
TD	3.47	2.17	1.50	1.26	1.06	0.94	1.00	0.68	0.61	0.65
TS	2.85	2.34	1.67	1.44	1.34	1.14	1.08	0.91	0.73	0.50
STS	3.89	3.23	2.58	1.93	1.67	1.31	1.05	0.96	0.94	0.81
TY	6.63	5.15	4.83	4.29	4.00	4.48	4.10	3.40	3.07	3.85
STY	18.60	26.86	16.64	16.90	15.70	13.90	13.56	12.88	14.67	11.83
SuperTY	137/0	136/0	136/0	132/0	121/0	106/0	83/0	70/0	49/0	33/0

注:由于 SuperTY<0 的误差样本数为 0,因此直接给出≥0 的样本数。
Note: The sample numbers for SuperTY are given, because all the errors are larger than zero.

4 结论与讨论

本文通过检验分析 2009—2015 年 ECMWF 对西北太平洋热带气旋的集合预报性能,得到以下结论。

总体而言,ECMWF 集合预报对热带气旋的路径预测比较准确,其良好的预测能力为实际业务提供了相当大的帮助。不过在几个方面仍有较明显偏差:移向预报偏向实况左侧、移速预报偏慢、强度预测整体偏弱。

随着热带气旋强度增强,集合预报对其移速、移向的预报准确率明显提高;反之对强度预报的准确率逐渐减小,对台风及以上级别预报明显偏弱,尤其对超强台风的强度预报全部偏弱。

热带气旋在不同强度引导气流影响下有不同的移动情况,预报难度差异很大。当引导气流偏弱时,集合预报对热带气旋的预报不确定性较大,因此移向的预报误差最大;当引导气流偏强时,由于热带气旋移动较快,集合预报对移速预报效果较差。

在南海热带气旋三类常见的路径中,集合预报对西行、西北行两类的路径预报较准确,西行北折的路径较复杂,预报效果也较差。西行北折路径的热带气旋在转向前,集合预报对转向的判断发散度很大,因此移向预报误差明显,向北转折后路径趋于稳定,误差主要体现在移速预报上。

参考文献

陈国民,白莉娜,万日金,2017. 2015 年西北太平洋热带气旋预报精度评定[J]. 气象,43(4):501-507.

- 陈国民,曹庆,2014.2013年西北太平洋热带气旋预报精度评定[J].气象,40(12):1549-1557.
- 陈国民,曹庆,白莉娜,2015.2014年西北太平洋热带气旋预报精度评定[J].气象,41(12):1554-1561.
- 陈国民,汤杰,曾智华,2012.2011年西北太平洋热带气旋预报精度评定[J].气象,38(10):1238-1246.
- 陈国民,余晖,曹庆,2013.2012年西北太平洋热带气旋预报精度评定[J].气象,39(10):1350-1358.
- 陈联寿,1985.热带气旋运动研究和业务预报的现状和发展[C]//台风会议文集.北京:气象出版社:6-30.
- 陈联寿,丁一汇,1979.西太平洋台风概论[M].北京:科学出版社:491.
- 杜钧,2002.集合预报的现状和前景[J].应用气象学报,13(1):16-28.
- 费亮,吴天泉,徐静远,1985.我国台风业务预报的评价[J].气象科学研究院院刊,4(3):319-327.
- 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.
- 沙天阳,杨国杰,程正泉,2015.基于欧洲中心台风集合预报报文的预报产品简介[J].广东气象,37(1):4-9.
- 汤杰,陈国民,余晖,2011.2010年西北太平洋台风预报精度评定及分析[J].气象,37(10):1320-1328.
- 田永祥,赵远东,1997.热带气旋强度影响其移动的物理机制[J].南京气象学院学报,20(1):11-17.
- 涂小萍,姚日升,张春花,等,2012.西北太平洋(含南海)热带气旋路径集成预报分析[J].热带气象学报,28(2):204-210.
- 王长甫,余荣华,刘福晓,等,1991.多层加权平均引导台风路径预报方法[J].应用气象学报,2(4):434-439.
- 王晨稀,2013.热带气旋集合预报研究进展[J].热带气象学报,29(4):698-704.
- 杨昌贤,郑艳,林建兴,等,2008.数值预报产品检验和评估[J].气象研究与应用,29(2):32-37.
- 杨国杰,沙天阳,程正泉,等,2014.2013年欧洲中心台风集合预报的检验[J].广东气象,36(2):1-5.
- 张涵斌,智协飞,王亚男,等,2015.基于TIGGE资料的西太平洋热带气旋多模式集成预报方法比较[J].气象,41(9):1058-1067.
- 张守峰,高拴柱,李月安,2007.集成方法在热带气旋路径和强度预报中的应用[J].气象科技,35(2):161-165.
- 钟铨,何夏江,董克勤,1985.三层权重订正引导台风预报方案初步应用[J].气象,14(7):3-8.
- Elsberry R L, Carr III L E, 2000. Consensus of dynamical tropical cyclone track forecasts—errors versus spread[J]. Mon Wea Rev, 128(12):4131-4138.
- Elsberry R L, Dobos P H, 1990. Time consistency of track prediction aids for Western North Pacific tropical cyclones[J]. Mon Wea Rev, 118(3):746-754.
- Elsberry R L, Peak J E, 1986. An evaluation of tropical cyclone forecast aids based on cross-track and along-track components[J]. Mon Wea Rev, 114(1):147-155.
- Goerss J S, 2007. Prediction of consensus tropical cyclone track forecast error[J]. Mon Wea Rev, 135(5):1985-1993.
- Ying Ming, Zhang Wei, Yu Hui, et al, 2014. An overview of the China meteorological administration tropical cyclone database[J]. J Atmos Oceanic Technol, 31(2):287-301.