大气科学
CHINESE JOURNAL OF ATMOSPHERIC SCIENCES

台风路径数值预报实时订正技术及其集成应用

危国飞 刘会军 潘宁 冷典颂 吴启树

Real-Time Correction Method for Numerically Modeled Typhoon Tracks and Its Integrated Application

WEI Guofei LIU Huijun PAN Ning LENG Diansong WU Qishu

在线阅读 View online: https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9895.2010.19237

您可能感兴趣的其他文章 Articles you may be interested in

不同卫星微波遥感资料同化对台风路径模拟的影响

Effects of Assimilating Microwave Remote Sensing Data of Different Satellite on the Simulation of Typhoon Track

大气科学. 2018, 42(2): 398 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9895.1709.17150

高空冷涡影响台风（ ）北翘路径的集合预报分析

大气科学. 2019, 43(4): 730 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9895.1810.18122

改进的超级集成预报方法在长江三角洲地区O_3预报中的应用

Application of Improved Super Ensemble Forecast Method for O_3 and Its Performance Evaluation over the Yangtze River Delta Region

大气科学. 2018, 42(6): 1273 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9895.1801.17167

位涡倾向在Muifa台风路径转折中的应用

Application of Potential Vorticity Tendency in Track Recurvature Study of Typhoon Muifa

大气科学. 2018, 42(2): 281 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9895.1709.17111

AMSR2辐射率资料同化对台风“山神”分析和预报的影响研究

The Impact of AMSR2 Radiance Data Assimilation on the Analysis and Forecast of Typhoon Son-Tinh

大气科学. 2017, 41(2): 372 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9895.1608.16127

超强台风“天鹅”（2015）路径突变过程机理研究

A Mechanism Study on the Sudden Track Change of Super Typhoon Goni (2015)

大气科学. 2018, 42(1): 227 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9895.1708.16280

关注微信公众号，获得更多资讯信息

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 Guofei, LIU Huijun, PAN Ning, et al. 2021. Real-Time Correction Method for Numerically Modeled Typhoon Tracks and Its Integrated Application [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 45(1): 195−204. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2010.19237

台风路径数值预报实时订正技术及其集成应用

危国飞[1,2] 刘会军[1,2] 潘宁[1,2] 冷典颂[1,2] 吴启树[1,2]

1 福建省灾害天气重点实验室，福州 350001
2 福建省气象台，福州 350001

摘 要 以台风路径数值预报的短时效预报偏差和目标时效（指所需订正的时效）的纬度预报为预报因子，采用多元线性回归方法建立了台风路径预报的偏差预估方程，继而对台风路径预报进行实时订正。本文以 12 h 为短时效，通过对欧洲中期天气预报中心确定性预报模式（ECMWF-IFS）和集合预报模式（ECMWF-EPS）的台风路径预报的应用，得到以下结论：2018 年试报结果表明，24 h、36 h、48 h、60 h、72 h、84 h 订正后的 ECMWF-IFS 台风路径预报的平均距离误差分别比订正前减小了 7.3 km、9.3 km、8.9 km、6.5 km、6.9 km、2.6 km，总体来说较强台风（指 12 h 的台风强度实况≥32.7 m s^{-1}）路径预报的订正效果更好。尝试了先对 ECMWF-EPS 各成员的台风路径预报进行订正，再进行集成预报，并对比了以下 5 种方式得到的台风路径预报：“订正后的确定性预报”、“所有集合预报成员集合平均”、“优选集合预报成员集合平均”、“所有集合预报成员先订正再集合平均”和“优选集合预报成员先订正再集合平均”，2018 年试报结果表明，对于平均距离误差，24 h 和 36 h “优选集合预报成员先订正再集合平均”最小，48 h 和 60 h “所有集合预报成员先订正再集合平均”最小，72 h 和 84 h “优选集合预报成员集合平均”最小，如果在业务中有针对性地进行应用，有望获得一个在各预报时效表现都较优异的台风路径客观综合预报结果。24 h、36 h、48 h、60 h “优选集合预报成员先订正再集合平均”的平均距离误差分别比“所有集合预报成员集合平均”减小了 13.3 km、11.7 km、10.0 km、7.6 km，比中央气象台官方预报（对应的时效为 12 h、24 h、36 h、48 h）减小了 0.7 km、2.0 km、3.9 km、2.4 km。

关键词 台风路径 数值预报 订正 集成
文章编号 1006-9895(2021)01-0195-10 **中图分类号** P456 **文献标识码** A
doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2010.19237

Real-Time Correction Method for Numerically Modeled Typhoon Tracks and Its Integrated Application

WEI Guofei[1,2], LIU Huijun[1,2], PAN Ning[1,2], LENG Diansong[1,2], and WU Qishu[1,2]

1 *Fujian Key Laboratory of Severe Weather*, *Fuzhou* 350001
2 *Fujian Provincial Meteorological Observatory*, *Fuzhou* 350001

Abstract Using the short-lead-time forecast bias and target-lead-time latitude forecast (i.e., the lead time required to be

收稿日期 2019-10-22；**网络预出版日期** 2020-09-02
作者简介 危国飞，男，1987 年出生，硕士研究生、工程师，主要从事天气预报技术方法研究。E-mail: weiguofei@zju.edu.cn
通讯作者 刘会军，E-mail: 21006262@zju.edu.cn
资助项目 中国气象局预报员专项 CMAYBY2017-035，气象预报业务关键技术发展专项子项目 YBGJXM(2018)1B-05，福建省自然科学基金社会发展引导性（重点）项目（2017Y-008）

Funded by China Meteorological Administration Forecaster Special Project (Grant CMAYBY2017-035), Meteorological Forecasting Operation Key Technology Development Program (Grant YBGJXM(2018)1B-05), Social Development Guiding (Key) Project of Fujian Natural Science Foundation (Grant 2017Y-008)

corrected) of numerically forecasted typhoon tracks as the predictors, a track forecast bias prediction equation is established by multiple linear regression. The equation permits typhoon track forecast correction in real time. In this paper, 12 h is taken as the short lead time, and the European Center for Medium-Range Weather Forecasts deterministic prediction system (ECMWF-IFS) and ensemble prediction system (ECMWF-EPS) for typhoon track forecasts are applied. The modeled forecast results from 2018 show that the mean track error of the corrected typhoon tracks forecasted by ECMWF-IFS at 24 h, 36 h, 48 h, 60 h, 72 h, and 84 h is reduced by 7.3 km, 9.3 km, 8.9 km, 6.5 km, 6.9 km, and 2.6 km, respectively, compared with those of uncorrected typhoon tracks. In general, the corrective effect is better for strong typhoons (observed intensity at 12 h≥32.7 m s^{-1}). First, the typhoon track forecast of each ensemble forecast member from ECMWF-EPS is corrected; the integrated forecast is then obtained. The typhoon track forecasts obtained by the following five methods are compared: "corrected deterministic prediction," "ensemble mean of all ensemble forecast members," "ensemble mean of selective ensemble forecast members," "ensemble mean of all corrected ensemble forecast members," and "ensemble mean of corrected selective ensemble forecast members." The modeled forecast results from 2018 show that "ensemble mean of corrected selective ensemble forecast members," "ensemble mean of all corrected ensemble forecast members," and "ensemble mean of selective ensemble forecast members" yield the lowest track error at 24 h and 36 h, 48 h and 60 h, and 72 h and 84 h, respectively. When applied in a targeted manner in operational application, an objective comprehensive forecast result for typhoon tracks with excellent performance for each lead time is expected. At 24 h, 36 h, 48 h, and 72 h, the mean track error of "ensemble mean of corrected selective ensemble forecast members" is reduced by 13.3 km, 11.7 km, 10.0 km and 7.6 km, respectively, compared with those of "ensemble mean of all ensemble forecast members" and by 0.7 km, 2.0 km, 3.9 km, and 2.4 km, respectively, compared with those of the Central Meteorological Office official track forecast (with corresponding lead times of 12 h, 24 h, 36 h, and 48 h, respectively).

Keywords Typhoon track, Numerical forecast, Correction, Integrated forecast

1 引言

西北太平洋是全球台风（包括热带风暴、强热带风暴、台风、强台风和超强台风，下同）发生频率最高、强度最大的海域。我国大陆位于西北太平洋沿岸，大陆海岸线长达 18000 多千米，平均每年约有 7 个台风登陆我国，年均造成约占当年 GDP 0.36% 的直接经济损失和约 9412.8 人的人员伤亡，是全球受台风影响最大的国家之一（雷小途等, 2009）。提高台风灾害的监测、预警服务水平，增强我国防台减灾能力，关键是不断提高我国台风业务预报的准确率（许映龙等, 2010）。研究表明，对于单个登陆台风而言，24 h 路径预报误差每减小 1 km 可减少因灾直接经济损失约 0.97 亿元（人民币，下同），24 h 强度预报误差每减小 1 m s^{-1} 可减少因灾直接经济损失约 3.8 亿元（吴影等, 2017）。

台风风雨预报与台风路径预报密切相关，因此台风路径预报是台风风雨预报的基础，历来受到人们的关注和研究，特别是 20 世纪 80 年代以来，取得了丰硕的成果。国内外许多气象学者进行了很多台风路径主、客观预报方法的研究，其中台风路径客观预报方法主要有以下三种：第一，统计学方法，即统计预报；第二，动力学方法，即数值模式预报；第三，统计—动力学方法，即基于数值模式预报的模式释用技术。在数值预报被广泛应用之前，人们进行主观预报方法（包澄澜等, 1979; 陈联寿, 1979; 王志烈, 1981; 丁金才和唐新章, 1985; 韦有暹和朱庆圻, 1985）和统计学方法的研究较多（上海台风协作研究组, 1977; 董克勤和李曾中, 1980; 金一鸣, 1983; 王作述和傅秀琴, 1983; 王长甫等, 1991; 何夏江等, 1996; 李建云和丁裕国, 1998）。得益于模式动力框架、物理过程、分辨率、初始化以及与海洋模式的耦合等方面的进展，全球模式台风路径预报误差在各海域持续减小，但基于数值模式预报的统计—动力学方法仍然比数值模式预报具有更高的预报精度（Heming, 2017; 麻素红和陈德辉, 2018; 端义宏等, 2020）。

早期的台风路径统计—动力学预报方法大多是基于单模式预报的（Neumann and Lawrence, 1975; 倪允琪和薛宗元, 1980; 金一鸣和钟元, 1997），后来人们发现台风路径集成预报技术是在现行模式、计算机资源条件下获得最优预报效果的更有效方法（王晨稀, 2013）。Goerss（2000）采用等权集合

平均方法对 1995～1996 年大西洋飓风进行集成预报试验，发现集成预报 24 h、48 h 和 72 h 路径预报平均距离误差分别比最好的单个模式预报减小了 16%、20% 和 23%。Kumar et al.（2003）、张守峰等（2007）、周文友和智协飞（2012）、Zhi et al.（2012）、He et al.（2015）、智协飞等（2015）采用加权集合平均方法对西北太平洋台风路径进行了多模式集成预报试验，均发现集成预报结果明显好于各模式预报结果，也好于简单的集合平均结果。Elsberry and Carr III（2000）利用 5 个模式的预报结果对西北太平洋台风路径进行了多模式集成预报试验，提出一种辨别并剔除误差大的预报结果后再平均的集成方法，结果表明有选择性的集成方法优于简单的无选择性的集成方法。钱奇峰等（2014）、Qi et al.（2014）、Dong and Zhang（2016）通过对集合预报成员的短时效预报误差进行评估，并从中挑选出表现较好的成员进行长时效的预报集成，集成结果明显优于所有成员等权集合平均，他们（钱奇峰等, 2014; Qi et al., 2014）还发现对筛选出的集合成员进行等权集合平均的预报效果要优于加权集合平均。

由于数值模式运行、后处理及资料传输等耗时，数值预报资料的获得时间滞后于数值模式的起报时间，因此预报员在制作业务预报时可以利用实况数据来估计数值模式的短时效预报偏差。业务中发现台风路径数值预报的短时效预报偏差与随后较长时效预报偏差有较好的正相关关系，预报员可以利用短时效预报偏差来估计随后较长时效预报偏差，继而对数值模式预报进行订正。Qi et al.（2014）、Zhang and Yu（2017）、Guo et al.（2018）、郭蓉等（2019）使用一种平移订正法对台风路径数值预报进行订正试验，该方法假设台风路径数值预报的短时效预报偏差与长时效预报偏差完全一致，结果表明该方法在 48 h 之前有一定的订正效果。平移订正法简单快捷，但订正效果一般，其短时效预报偏差与长时效预报偏差完全一致的假设不合理。需要研究更有效的方法将这种预报思路客观化、最优化。

通过检验发现，欧洲中期天气预报中心（European Center for Medium-Range Weather Forecasts，ECMWF）台风路径数值预报的短时效预报偏差与随后较长时效预报偏差有较好的正相关关系，某时效的纬度预报与该时效的纬向预报偏差有较好的负相关关系。本文拟根据这种相关性，建立台风路径数值预报的偏差预估模型，继而对台风路径数值预报进行偏差订正，对订正后的集合预报各成员开展集成预报实验。研究结果对提高我国台风业务路径预报水平和增强我国防台减灾能力有所裨益。

2　资料

本文的研究对象是 2013～2018 年活动于西北太平洋（包括南海）的所有台风。本文使用欧洲中期天气预报中心确定性预报模式（Integrated Forecast System，ECMWF-IFS）和集合预报模式（Ensemble Prediction System，ECMWF-EPS）的台风路径预报资料，从中国气象局上海台风研究所的官方网站 http://www.sti.org.cn [2020-10-04] 下载，起报时间为 08:00 和 20:00（北京时，下同），集合预报的成员为 51 个。台风位置和强度的实况采用中央气象台台风实时定位定强资料，台风路径官方预报采用中央气象台官方预报，均从中央气象台官方网站 http://m.nmc.cn[2020-04-23] 下载。由于本研究主要针对台风业务预报使用，因此台风位置实况使用的是中央气象台台风实时定位资料，而没有使用热带气旋最佳路径资料。

3　台风路径数值预报实时订正技术

3.1　路径预报偏差统计分析

本文把台风路径预报偏差定义为台风中心预报位置与观测位置的球面距离差，台风路径预报偏差可分解为纬向预报偏差和经向预报偏差，如预报位置的经度为 J_f，纬度为 W_f，观测位置的经度为 J_o，纬度为 W_o，则纬向预报偏差为 $(J_f-J_o)\cdot R\cdot\cos(W_f)\cdot\pi/180$，经向预报偏差为 $(W_f-W_o)\cdot R\cdot\pi/180$，其中 R 为地球半径。2013～2017 年 ECMWF-IFS 台风路径预报 24 h、36 h、48 h、60 h、72 h、84 h 的平均纬向预报偏差分别为−12.3 km、−14.4 km、−14.8 km、−13.2 km、−10.3 km、−10.7 km，平均经向预报偏差分别为 1.7 km、1.5 km、2.6 km、2.2 km、1.1 km、0.6 km，说明 ECMWF-IFS 台风路径预报在 24～84 h 存在比实况偏西、偏北的系统性偏差，且纬向的系统性偏差比经向的系统性偏差要明显得多。

业务中，若预报员在 08 时制作 0～24 h 的业务预报，其参考的一般是前一天 20 时起报的 ECMWF 模式资料 12～36 h 的预报结果，即业务

预报起报时间与最新模式预报的 12 h 对应。本文以 12 h 预报偏差作为短时效预报偏差为例建立台风路径数值预报实时订正模型。从表 1 可知，ECMWF-IFS 台风路径预报 12 h 的纬向预报偏差与随后较长时效的纬向预报偏差有较好的正相关关系，12 h 的经向预报偏差与随后较长时效的经向预报偏差有较好的正相关关系，预报时效越长，相关系数越小。ECMWF-IFS 台风路径预报某时效的纬度预报与该时效的纬向预报偏差有较好的负相关关系，即纬度预报越高，台风中心预报位置比实况偏西的趋势越明显；24～48 h 相关系数差别不大，48 h 之后相关系数的绝对值明显减小。

由图 1 和图 2 可知，ECMWF-IFS 台风路径预报 12 h 的纬向预报偏差与 24 h 的纬向预报偏差、12 h 的经向预报偏差与 24 h 的经向预报偏差、24 h 的纬度预报与 24 h 的纬向预报偏差都呈较好的线

表 1　2013～2017 年 ECMWF-IFS 台风路径预报 12 h 的纬向预报偏差与随后较长时效的纬向预报偏差的相关系数（相关系数 1）、12 h 的经向预报偏差与随后较长时效的经向预报偏差的相关系数（相关系数 2）、某时效的纬度预报与该时效的纬向预报偏差的相关系数（相关系数 3）。表中除了括号中的相关系数外，其他全都通过 95% 信度水平的显著性检验

Table 1　Correlation coefficients between zonal forecast bias of typhoon tracks at 12 h and following lead times (corresponding to the second column in the table), between meridional forecast bias of typhoon tracks at 12 h and following lead times (corresponding to the third column in the table), and between latitude forecast of typhoon tracks at some lead time and zonal forecast bias of typhoon tracks at that lead time (corresponding to the fourth column in the table). The typhoon tracks are forecasted by ECMWF-IFS (Integrated Forecast System, European Center for Medium-Range Weather Forecasts) from 2013 to 2017. All correlation coefficients in the table, except the one in brackets, are statistically significant at the 95% confidence level

预报时效/h	相关系数1	相关系数2	相关系数3	样本数
24	0.54	0.46	−0.13	1199
36	0.41	0.31	−0.15	1079
48	0.30	0.25	−0.14	954
60	0.17	0.20	−0.09	838
72	0.14	0.15	−0.08	738
84	0.08	0.11	(−0.06)	626

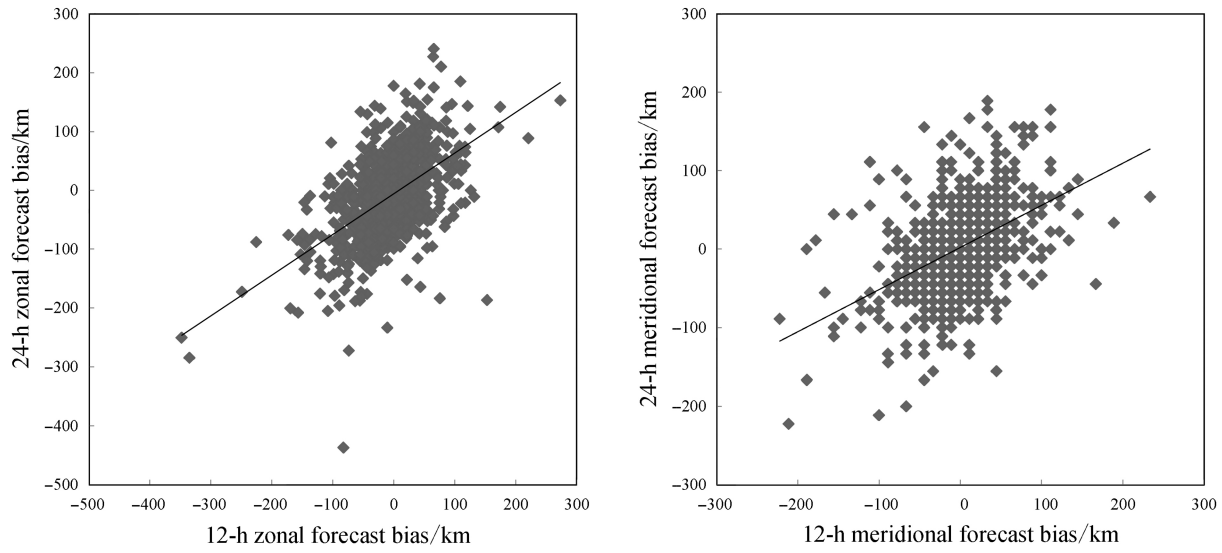

图 1　2013～2017 年 ECMWF-IFS 台风路径预报 12 h 和 24 h 的纬向（左）预报偏差、经向（右）预报偏差的散点图。样本数为 1199，斜线为线性趋势线

Fig. 1　Scatter diagrams of zonal forecast bias (left) and meridional forecast bias (right) of typhoon tracks at 12 h and 24 h. Typhoon tracks are forecasted by ECMWF-IFS from 2013 to 2017. The number of samples is 1199. The diagonal line denotes the linear trend

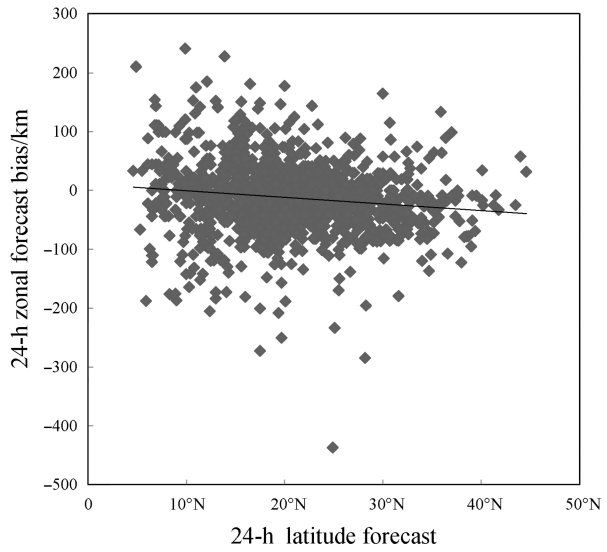

图 2　2013～2017 年 ECMWF-IFS 台风路径预报 24 h 的纬度预报与 24 h 的纬向预报偏差的散点图。样本数为 1199，斜线为线性趋势线

Fig. 2　Scatter diagram of latitude forecast and zonal forecast bias of typhoon tracks at 24 h. Typhoon tracks are forecasted by ECMWF-IFS from 2013 to 2017. The number of samples is 1199. The diagonal line denotes the linear trend

性关系。这种线性关系在 24 h 之后的其他时效也有体现（图略，相关系数见表 1），但随着预报时效的延长，线性关系逐渐变得不明显。因此可以根据 ECMWF-IFS 台风路径预报 12 h 的纬向预报偏差、目标时效（指所需订正的时效，下同）的纬度预报和纬向系统性偏差去预估目标时效的纬向预报偏差；可以根据 12 h 的经向预报偏差和目标时效的经向系统性偏差，去预估目标时效的经向预报偏差，继而对台风路径预报进行偏差订正。

3.2　基于预估偏差的实时订正模型

由以上分析可知，对于某个台风的某次路径预报，可以建立 ECMWF-IFS 台风路径预报的偏差预估方程和订正方程：

$$\begin{cases} M_i = a_i \times M_{12} + b_i, \\ Z_i = c_i \times Z_{12} + d_i \times W_i + e_i, \\ W_i^* = W_i - (M_i/R) \times (180/\pi), \\ J_i^* = J_i - (Z_i/(R \times \cos(W_i))) \times (180/\pi), \end{cases} \quad (1)$$

其中，i 为预报时效，M_i、Z_i 分别为 i 时效经向预报偏差、纬向预报偏差的预估值（单位：km），M_{12}、Z_{12} 分别为 12 h 预报的经向预报偏差、纬向预报偏差（单位：km），W_i、J_i 分别为 i 时效订正前的纬度、经度预报 [单位：(°)]，W_i^*、J_i^*分别为 i 时效订正后的纬度、经度预报 [单位：(°)]，R 为地球半径。a_i、c_i、d_i 为 i 时效的回归系数，b_i、e_i 为 i 时效的常数项，根据一定长度（训练期）的历史资料采用最小二乘法求解。

3.3　最优滑动训练期样本数

考虑到模式预报能力在持续不断地升级，较远的历史资料对当前预报订正的参考意义不大，故本文采用滑动训练期训练偏差预估方程的相关参数。即对某次预报进行订正，取距其起报时间最近的过去 N 组有效的模式数据和实况数据作为训练样本，这样对于每次预报都由新的训练样本来确定偏差预估方程的相关参数，使订正效果更加稳定。图 3 给出了 2016～2017 年订正后的 ECMWF-IFS 台风路径预报的订正技巧随滑动训练期样本数 N 的变化，订正技巧指订正前的平均距离误差减去订正后的平均距离误差，正值越大，技巧水平越高。可以看出，24 h、36 h、48 h 的订正技巧随着 N 的增大先快速波动式增大、后趋于稳定；60 h、72 h、84 h 的订正技巧随着 N 的增大先快速波动式增大、达到最高点后波动式减小。24 h、36 h、48 h、60 h，N 取 450，72 h，N 取 430，84 h，N 取 375，各时效的订正技巧达到或接近最大，因此确定 24 h、36 h、48 h、60 h、72 h、84 h 的最优滑动训练期样本数分别为 450、450、450、450、430、375。

3.4　2016～2017 年回报结果分析

2016～2017 年回报结果（表 2）表明，24 h、36 h、48 h、60 h、72 h、84 h ECMWF-IFS 台风路径预报订正前的平均距离误差分别为 62.2 km、79.3 km、105.8 km、145.8 km、193.2 km、236.8 km；如果只对纬向预报偏差进行订正，订正后的平均距离误差分别比订正前减小了 4.4 km、3.5 km、2.0 km、0.8 km、0.5 km、1.2 km；如果只对经向预报偏差进行订正，订正后的平均距离误差分别比订正前减小了 2.0 km、0.4 km、0.5 km、1.2 km、1.0 km、0.3 km。总体来看纬向预报偏差的订正效果比经向预报偏差的订正效果好。如果对经向预报偏差和纬向预报偏差都进行订正，订正后的平均距离误差分别比订正前减小了 6.6 km、4.3 km、2.8 km、2.0 km、1.5 km、1.6 km。

3.5　2018 年试报结果分析

为了验证台风路径数值预报实时订正技术的订正效果，对 2018 年 ECMWF-IFS 台风路径预报进行了独立样本订正试验。结果（表 3）表明，24 h、

表 2　2016～2017 年 ECMWF-IFS 台风路径预报订正前后的平均距离误差（单位：km）。括号内数字表示样本数

Table 2　Mean track errors of uncorrected and corrected typhoon tracks forecasted by ECMWF-IFS from 2016 to 2017. The numbers in brackets indicate the number of samples

台风路径预报	不同预报时效的平均距离误差/km					
	24 h (402)	36 h (358)	48 h (307)	60 h (262)	72 h (228)	84 h (187)
订正前	62.2	79.3	105.8	145.8	193.2	236.8
只订正纬向预报偏差	57.8	75.8	103.8	145.0	192.7	235.6
只订正经向预报偏差	60.2	78.9	105.3	144.6	192.2	236.5
纬向和经向预报偏差都订正	**55.6**	**75.0**	**103.0**	**143.8**	**191.7**	**235.2**

注：加粗的数字为每个预报时效的最小值。

表 3　2018 年 ECMWF-IFS 台风路径预报订正前后的平均距离误差（单位：km）。括号内数字表示样本数

Table 3　Mean track errors of uncorrected and corrected typhoon tracks forecasted by ECMWF-IFS in 2018. The numbers in brackets indicate the number of samples

台风路径预报	不同预报时效的平均距离误差/km					
	24 h (268)	36 h (245)	48 h (220)	60 h (196)	72 h (171)	84 h (150)
订正前	63.5	85.4	109.2	131.9	162.1	195.6
预估偏差订正法	**56.2**	**76.1**	**100.3**	**125.4**	**155.2**	**193.0**
平移订正法	60.4	81.6	104.7	130.6	162.0	198.5

注：加粗的数字为每个预报时效的最小值。

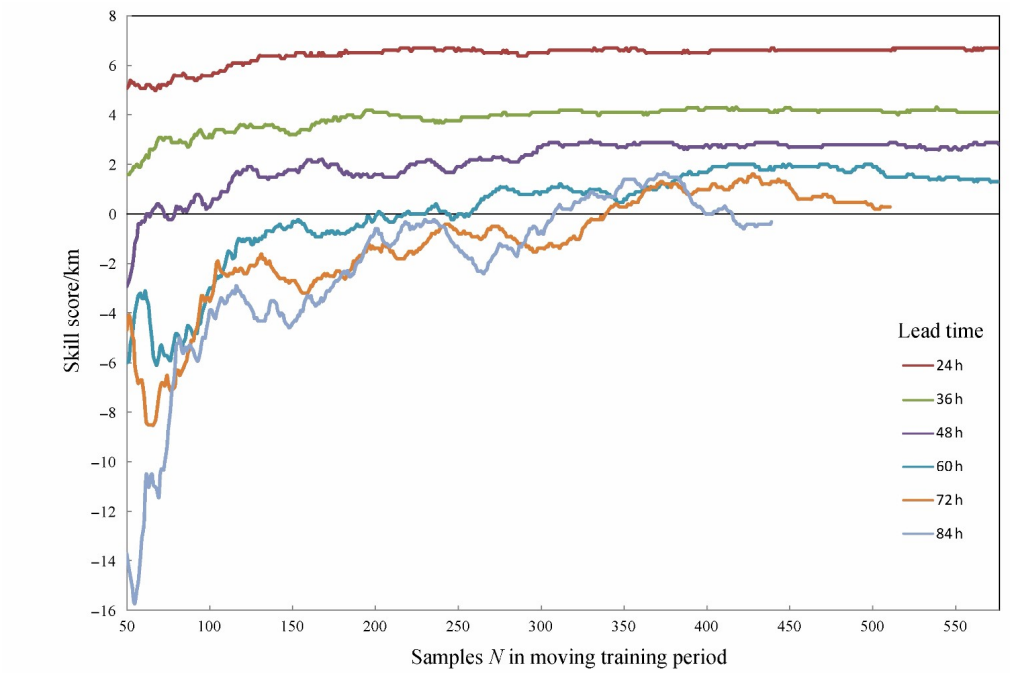

图 3　2016～2017 年订正后的 ECMWF-IFS 台风路径预报的订正技巧随滑动训练期样本数 N 的变化

Fig. 3　Skill score of corrected typhoon tracks forecasted by ECMWF-IFS from 2016 to 2017, changing with number of samples N in a moving training period

36 h、48 h、60 h、72 h、84 h ECMWF-IFS 台风路径预报订正前的平均距离误差分别为 63.5 km、85.4 km、109.2 km、131.9 km、162.1 km、195.6 km，订正后的平均距离误差分别比订正前减小了 7.3 km、9.3 km、8.9 km、6.5 km、6.9 km、2.6 km。尝试用平移订正法对 2018 年 ECMWF-IFS 台风路径预报

进行订正，24 h、36 h、48 h、60 h、72 h、84 h 订正后的平均距离误差分别比订正前减小了 3.1 km、3.8 km、4.5 km、1.3 km、0.1 km、−2.9 km，平移订正法的订正效果不如本文所提出的预估偏差订正法。

台风路径数值预报实时订正技术的订正效果显然和 12 h 台风路径预报偏差的可靠性密切相关，而 12 h 台风路径预报偏差的可靠性又与中央气象台台风实时定位的误差大小密切相关。一般来说，台风越强，其结构特征就越成熟、显著，定位也就相对要容易且准确些，因而定位误差较小；而当台风较弱时，由于其云系等结构特征不很明显，难于较准确地确定其中心位置，因而定位误差较大（雷小途, 2001）。所以从理论上来说，对较强台风，本文所提出的台风路径数值预报实时订正技术的订正效果更好。根据 12 h 台风近中心最大风速的实况把 2018 年的样本分为台风及以上强度和强热带风暴及以下强度两类，两类在各预报时效的样本数基本相当。对于台风及以上强度类，24 h、36 h、48 h、60 h、72 h、84 h 订正后的平均距离误差分别比订正前减小了 19.9%、11.5%、6.8%、6.7%、6.0%、2.2%；对于强热带风暴及以下强度类，订正后的平均距离误差分别比订正前减小了 6.5%、10.5%、9.0%、3.7%、3.0%、0.7%，除了 48 h 外，台风及以上强度类的订正效果明显好于强热带风暴及以下强度类的订正效果。

4　多集合预报成员的集成应用

根据集合预报每个成员的历史资料建立各自的台风路径预报实时订正模型，继而对集合预报各成员的台风路径预报进行订正，对基于集合预报的台风路径统计—动力学预报方法，基于订正后的集合预报可能会比基于订正前的集合预报有更好的效果。

钱奇峰等（2014）研究发现，根据台风实时位置，选择最新 ECMWF-EPS 各成员台风路径中路径误差最小的 M 条路径进行算术平均，得到的订正路径 24 h、48 h、72 h、96 h 的平均距离误差分别比“所有集合预报成员集合平均”减小了 15%、6%、10%、8%。应用于本研究时 M 在 24 h、36 h 时取 15，在 48～84 h 时取 20。根据 ECMWF-EPS 各成员台风路径预报 12 h 的路径误差大小优选 M 个集合预报成员，对优选出的成员取集合平均得到的台风路径简称为“优选集合预报成员集合平均”，对优选出的成员先进行路径预报订正再取集合平均得到的台风路径简称为“优选集合预报成员先订正再集合平均”。对 ECMWF-EPS 每个成员的台风路径预报先进行订正，再对所有成员取集合平均，得到的台风路径简称为“所有集合预报成员先订正再集合平均”。

2018 年试报结果（表 4）表明，24 h、36 h、48 h、60 h、72 h、84 h“优选集合预报成员集合平均”的平均距离误差分别比“所有集合预报成员集合平均”减小了 10.3 km、10.3 km、6.4 km、7.2 km、4.9 km、3.1 km，说明有选择性的集合方法优于简单的无选择性的集合方法，与钱奇峰等（2014）、Qi et al.（2014）、Dong and Zhang（2016）得出的结论类似。24 h、36 h、48 h、60 h、72 h、84 h“所有集合预报成员先订正再集合平均”的平均距离误差分别比“所有集合预报成员集合平均”减小了 12.1 km、10.8 km、10.9 km、8.1 km、4.4 km、

表 4　2018 年台风路径客观预报和中央气象台官方预报的平均距离误差（单位：km）。括号内数字表示样本数

Table 4　Mean track errors of objective forecasts and the Central Meteorological Office official forecast in 2018. The numbers in brackets indicate the number of samples

台风路径预报	不同预报时效的平均距离误差/km					
	24 h (263)	36 h (240)	48 h (213)	60 h (188)	72 h (163)	84 h (142)
订正后的确定性预报	56.6	75.8	99.8	124.2	151.1	187.2
所有集合预报成员集合平均	63.0	83.6	107.9	131.6	155.7	186.8
优选集合预报成员集合平均	52.7	73.3	101.5	124.4	**150.8**	**183.7**
所有集合预报成员先订正再集合平均	50.9	72.8	**97.0**	**123.5**	151.3	188.2
优选集合预报成员先订正再集合平均	**49.7**	**71.9**	97.9	124.0	151.7	188.5
中央气象台官方预报	50.4	73.9	101.8	126.4	150.3	182.9

注：加粗的数字为每个预报时效客观预报的最小值。预报时效是相对于模式起报时间来说的，基于数值模式预报的可应用性，采用主观预报与预报时效滞后12 h的数值模式预报对比，即24 h对应中央气象台官方预报是12 h，36 h对应中央气象台官方预报是24 h，以此类推。

−1.4 km，订正效果较显著的时段主要在 72 h 之内，84 h 没有订正效果。24 h、36 h、48 h、60 h、72 h、84 h“优选集合预报成员先订正再集合平均”的平均距离误差分别比“优选集合预报成员集合平均”减小了 3.0 km、1.4 km、3.6 km、0.4 km、−0.9 km、−4.8 km，比中央气象台官方预报减小了 0.7 km、2.0 km、3.9 km、2.4 km、−1.4 km、−5.6 km，订正效果较显著的时段主要在 60 h 之内，之后没有订正效果。总体来看，“优选集合预报成员集合平均”、“所有集合预报成员先订正再集合平均”和“优选集合预报成员先订正再集合平均”的预报效果要好于“所有集合预报成员集合平均”和“订正后的确定性预报”。在客观预报之间比较，24 h 和 36 h“优选集合预报成员先订正再集合平均”的平均距离误差最小，48 h 和 60 h“所有集合预报成员先订正再集合平均”的平均距离误差最小，72 h 和 84 h“优选集合预报成员集合平均”的平均距离误差最小。

5 结论与讨论

本文提出了一种业务上可用的针对确定性预报或集合预报各成员的台风路径预报实时订正技术，通过对 ECMWF-IFS 和 ECMWF-EPS 的台风路径预报的应用，得到以下几点结论。

（1）ECMWF-IFS 台风路径预报的短时效预报偏差与随后较长时效预报偏差有较好的线性关系，某时效的纬度预报与该时效的纬向预报偏差有较好的线性关系。以短时效预报偏差和目标时效的纬度预报为预报因子，采用多元线性回归方法建立了台风路径预报的偏差预估方程，继而对台风路径预报进行偏差订正。采用滑动训练期训练偏差预估方程的相关参数，24 h、36 h、48 h、60 h、72 h、84 h 的最优滑动训练期样本数分别为 450、450、450、450、430、375。

（2）2016～2017 年回报结果表明，在 24 h、36 h、48 h、60 h、72 h、84 h，订正后的 ECMWF-IFS 台风路径预报的平均距离误差分别比订正前减小了 6.6 km、4.3 km、2.8 km、2.0 km、1.5 km、1.6 km，且纬向预报偏差的订正效果比经向预报偏差的订正效果好。2018 年试报结果表明，在 24 h、36 h、48 h、60 h、72 h、84 h，订正后的 ECMWF-IFS 台风路径预报的平均距离误差分别比订正前减小了 7.3 km、9.3 km、8.9 km、6.5 km、6.9 km、2.6 km，订正效果明显优于平移订正法。总体来说，较强台风（指 12 h 的台风强度实况≥32.7 m s^{-1}）路径预报的订正效果更好。

（3）尝试了先对 ECMWF-EPS 各成员的台风路径预报进行订正，再进行集成预报，并对比了以下 5 种方式得到的台风路径预报：“订正后的确定性预报”、“所有集合预报成员集合平均”、“优选集合预报成员集合平均”、“所有集合预报成员先订正再集合平均”和“优选集合预报成员先订正再集合平均”，2018 年试报结果表明，24 h 和 36 h“优选集合预报成员先订正再集合平均”的平均距离误差最小，48 h 和 60 h“所有集合预报成员先订正再集合平均”的平均距离误差最小，72 h 和 84 h“优选集合预报成员集合平均”的平均距离误差最小，如果在业务中有针对性地进行应用，有望获得一个在各预报时效表现都较优异的台风路径客观综合预报结果。24 h、36 h、48 h、60 h“优选集合预报成员先订正再集合平均”的平均距离误差分别比“所有集合预报成员集合平均”减小了 13.3 km、11.7 km、10.0 km、7.6 km，比中央气象台官方预报（对应的时效为 12 h、24 h、36 h、48 h）减小了 0.7 km、2.0 km、3.9 km、2.4 km。

对于每次预报，都需要根据历史资料重新计算偏差预估方程的相关参数，在处理器为 Intel(R) Core(TM) i7-4790 CPU@3.60 GHz、内存为 4.00 GB 的台式计算机上运算一次最长耗时不会超过 15 s。中央气象台台风实时定位一般在整点后 30 min 内可以获得，在获得台风实时定位后进行台风路径数值预报实时订正的相关运算并发布订正后的台风路径数值预报，可以满足我国台风客观预报方法参加气象广播的时效性要求。

本文以 12 h 预报偏差作为短时效预报偏差建立了台风路径数值预报实时订正模型，业务应用时可根据需求把其他时效的预报偏差作为短时效预报偏差。对基于集合预报的台风路径统计—动力学预报方法，可以先对每个集合预报成员进行偏差订正，再进行后续的优选成员、加权集合等处理，可能会比直接利用未订正的集合预报成员有更好的效果。本研究结果在预报业务中具有较好的实用性和推广价值。

参考文献（References）

包澄澜, 魏荣茂, 黄长花. 1979. 西太平洋和南海地区赤道反气旋活动及其对台风路径的影响 [J]. 大气科学, 3(2): 141−149. Bao

Chenglan, Wei Rongmao, Huang Changhua. 1979. On the activity of equatorial anticyclone over the western Pacific and the South China Sea and its effects on the tracks of typhoon movement [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica) (in Chinese), 3(2): 141−149. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1979.02.05

陈联寿. 1979. 我国东部海面台风路径突然西折的成因分析 [J]. 大气科学, 3(3): 289−298. Chen Lianshou. 1979. On the causal analysis of typhoon tracks which turning direction westward suddenly over the sea area near the eastern China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica) (in Chinese), 3(3): 289−298. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1979.03.11

丁金才, 唐新章. 1985. 台风蛇行摆动路径的成因分析 [J]. 大气科学, 9(3): 217−225. Ding Jincai, Tang Xinzhang. 1985. An analysis of the causes for the zigzag track of typhoons [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica) (in Chinese), 9(3): 217−225. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1985.03.01

董克勤, 李曾中. 1980. 海南岛地形对过岛台风影响的初步研究 [J]. 大气科学, 4(3): 288−292. Dong Keqin, Li Zengzhong. 1980. A study of the effect of the earth's surface relief of Hainan Island on the passing by typhoon [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica) (in Chinese), 4(3): 288−292. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1980.03.12

Dong L, Zhang F Q. 2016. OBEST: An observation-based ensemble subsetting technique for tropical cyclone track prediction [J]. Wea. Forecasting, 31(1): 57−70. doi:10.1175/WAF-D-15-0056.1

端义宏, 方娟, 程正泉, 等. 2020. 热带气旋研究和业务预报进展——第九届世界气象组织热带气旋国际研讨会 (IWTC-9) 综述 [J]. 气象学报, 78(3): 537−550. Duan Yihong, Fang Juan, Cheng Zhengquan, et al. 2020. Advances and trends in tropical cyclone research and forecasting: An overview of the ninth World Meteorological Organization International Workshop on Tropical Cyclones (IWTC-9) [J]. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 78(3): 537−550. doi:10.11676/qxxb2020.050

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. doi:10.1175/1520-0493(2000)129<4131:CODTCT>2.0.CO;2

Goerss J S. 2000. Tropical cyclone track forecasts using an ensemble of dynamical models [J]. Mon. Wea. Rev., 128(4): 1187−1193. doi:10.1175/1520-0493(2000)128<1187:TCTFUA>2.0.CO;2

Guo R, Qi L B, Ge Q Q, et al. 2018. A study on the ensemble forecast real-time correction method [J]. J. Trop. Meteor., 24(1): 42−48. doi:10.16555/j.1006-8775.2018.01.004

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 Rong, Yu Hui, Qi Liangbo, et al. 2019. A study on multi-model ensemble forecast technique for typhoon track [J]. J. Meteor. Sci. (in Chinese), 39(6): 839−846. doi:10.3969/2018jms.0090

何夏江, 曾琮, 许永锞, 等. 1996. 热带气旋路径强度预报——SAPC 法 [J]. 应用气象学报, 7(1): 45−52. He Xiajiang, Zeng Cong, Xu Yongke, et al. 1996. A method of forecasting tropical cyclone track and intensity— SAPC method [J]. Quart. J. Appl. Meteor. (in Chinese), 7(1): 45−52.

He C F, Zhi X F, You Q L, et al. 2015. Multi-model ensemble forecasts of tropical cyclones in 2010 and 2011 based on the Kalman Filter method [J]. Meteor. Atmos. Phys., 127(4): 467−479. doi:10.1007/s00703-015-0377-1

Heming J T. 2017. Tropical cyclone tracking and verification techniques for Met Office numerical weather prediction models [J]. Meteor. Appl., 24(1): 1−8. doi:10.1002/met.1599

金一鸣. 1983. 多预报量双重筛选逐步回归在台风路径预报中的应用 [J]. 大气科学, 7(2): 235−238. Jin Yiming. 1983. Application of dual-screening and successive regression of multi-predictands to typhoon track forecasting [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica) (in Chinese), 7(2): 235−238. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1983.02.14

金一鸣, 钟元. 1997. 台风路径统计预报的改进 [J]. 热带气象学报, 13(2): 125−130. Jin Yiming, Zhong Yuan. 1997. An improvement of statistical prediction of typhoon tracks [J]. J. Trop. Meteor. (in Chinese), 13(2): 125−130.

Kumar T S V V, Krishnamurti T N, Fiorino M, et al. 2003. Multimodel superensemble forecasting of tropical cyclones in the Pacific [J]. Mon. Wea. Rev., 131(3): 574−583. doi:10.1175/1520-0493(2003)131<0574:MSFOTC>2.0.CO;2

雷小途. 2001. 西北太平洋热带气旋最佳定位的精度分析 [J]. 热带气象学报, 17(1): 65−70. Lei Xiaotu. 2001. The precision analysis of the best positioning on WNP TC [J]. J. Trop. Meteor. (in Chinese), 17(1): 65−70. doi:10.3969/j.issn.1004-4965.2001.01.007

雷小途, 陈佩燕, 杨玉华, 等. 2009. 中国台风灾情特征及其灾害客观评估方法 [J]. 气象学报, 67(5): 875−883. Lei Xiaotu, Chen Peiyan, Yang Yuhua, et al. 2009. Characters and objective assessment of disasters caused by typhoons in China [J]. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 67(5): 875−883. doi:10.11676/qxxb2009.085

李建云, 丁裕国. 1998. 台风路径预报集成方法的一个试验 [J]. 热带气象学报, 14(3): 258−262. Li Jianyun, Ding Yuguo. 1998. A forecast test of typhoon track by means of consensus forecast techniques [J]. J. Trop. Meteor. (in Chinese), 14(3): 258−262.

麻素红, 陈德辉. 2018. 国家气象中心区域台风模式预报性能分析 [J]. 热带气象学报, 34(4): 451−459. Ma Suhong, Chen Dehui. 2018. Analysis of performance of regional typhoon model in National Meteorological Center [J]. J. Trop. Meteor. (in Chinese), 34(4): 451−459. doi:10.16032/j.issn.1004-4965.2018.04.002

Neumann C J, Lawrence M B. 1975. An operational experiment in the statistical-dynamical prediction of tropical cyclone motion [J]. Mon. Wea. Rev., 103(8): 665−673. doi:10.1175/1520-0493(1975)103<0665:AOEITS>2.0.CO;2

倪允琪, 薛宗元. 1980. 应用数值预报的结果作西太平洋台风路径统计预报的尝试 [J]. 气象学报, 38(1): 36−43. Ni Yunqi, Xue Zongyuan. 1980. A test of statistical forecasting scheme for western Pacific typhoon tracks using numerical forecasting results as predictors [J]. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 38(1): 36−43. doi:10.11676/qxxb1980.004

Qi L B, Yu H, Chen P Y. 2014. Selective ensemble-mean technique for

tropical cyclone track forecast by using ensemble prediction systems [J]. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 140(680): 805−813. doi:10.1002/qj.2196

钱奇峰, 张长安, 高栓柱, 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 Qifeng, Zhang Chang'an, Gao Shuanzhu, et al. 2014. Real-time correction method for ensemble forecasting of typhoon tracks [J]. J. Trop. Meteor. (in Chinese), 30(5): 905−910. doi:10.3969/j.issn.1004-4965.2014.05.010

上海台风协作研究组. 1977. 台风移动的分型统计预报方法 [J]. 大气科学, 1(3): 214−222. Joint Research Group on Typhoon of Shanghai. 1977. A statistical method for forecasting typhoon movements with consideration of the synoptic situation classification [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica) (in Chinese), 1(3): 214−222. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1977.03.07

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. Wang Changfu, Yu Ronghua, Liu Fuxiao, et al. 1991. A multiple-layer weighted mean steering method of the typhoon track forecast [J]. Quart. J. Appl. Meteor. (in Chinese), 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. Wang Chenxi. 2013. Advances in tropical cyclone ensemble prediction [J]. J. Trop. Meteor. (in Chinese), 29(4): 698−704. doi:10.3969/j.issn.1004-4965.2013.04.020

王志烈. 1981. 亚洲上空西风带长波槽对西太平洋台风路径的影响 [J]. 大气科学, 5(2): 198−206. Wang Zhilie. 1981. The influence of the westerly belt long-wave trough over Asia on the western Pacific typhoon tracks [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica) (in Chinese), 5(2): 198−206. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1981.02.09

王作述, 傅秀琴. 1983. 双台风相互作用及对它们移动的影响 [J]. 大气科学, 7(3): 269−276. Wang Zuoshu, Fu Xiuqin. 1983. The interaction of binary typhoons and its influence on their movement [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica) (in Chinese), 7(3): 269−276. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1983.03.04

韦有暹, 朱庆圻. 1985. 南海和西北太平洋台风复杂路径的气候分析 [J]. 大气科学, 9(4): 358−365. Wei Youxian, Zhu Qingqi. 1985. A climato-statistical analysis of the complicated typhoon tracks over the South China Sea and northwestern Pacific [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica) (in Chinese), 9(4): 358−365. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1985.04.04

吴影, 陈佩燕, 雷小途. 2017. 登陆热带气旋路径和强度预报的效益评估初步研究 [J]. 热带气象学报, 33(5): 675−682. Wu Ying, Chen Peiyan, Lei Xiaotu. 2017. A preliminary study on the benefit assessment of track and intensity forecast of landfall tropical cyclones [J]. J. Trop. Meteor. (in Chinese), 33(5): 675−682. doi:10.16032/j.issn.1004-4965.2017.05.011

许映龙, 张玲, 高栓柱. 2010. 我国台风预报业务的现状及思考 [J]. 气象, 36(7): 43−49. Xu Yinglong, Zhang Ling, Gao Shuanzhu. 2010. The advances and discussions on China operational typhoon forecasting [J]. Meteor. Mon. (in Chinese), 36(7): 43−49. doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2010.7.009

Zhang X P, Yu H. 2017. A probabilistic tropical cyclone track forecast scheme based on the selective consensus of ensemble prediction systems [J]. Mon. Wea. Rev., 32(6): 2143−2157. doi:10.1175/WAF-D-17-0071.1

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. Zhang Shoufeng, Gao Shuanzhu, Li Yuean. 2007. Application of consensus method to forecast of tropical cyclones [J]. Meteor. Sci. Technol. (in Chinese), 35(2): 161−165. doi:10.3969/j.issn.1671-6345.2007.02.001

Zhi X F, Qi H X, Bai Y Q, et al. 2012. A comparison of three kinds of multimodel ensemble forecast techniques based on the TIGGE data [J]. Acta Meteor. Sinica, 26(1): 41−51. doi:10.1007/s13351-012-0104-5

智协飞, 孙晶, 周文友. 2015. 2009 年夏季西太平洋台风的集合预报和多模式集成预报试验 [J]. 大气科学学报, 38(5): 633−640. Zhi Xiefei, Sun Jing, Zhou Wenyou. 2015. Ensemble and multimodel ensemble forecasts of western Pacific typhoons during summer 2009 [J]. Trans. Atmos. Sci. (in Chinese), 38(5): 633−640. doi:10.13878/j.cnki.dqkxxb.20130620010

周文友, 智协飞. 2012. 2009 年夏季西太平洋台风路径和强度的多模式集成预报 [J]. 气象科学, 32(5): 492−499. Zhou Wenyou, Zhi Xiefei. 2012. Multimodel ensemble forecasts of the TC tracks and intensity over the western Pacific during the summer of 2009 [J]. J. Meteor. Sci. (in Chinese), 32(5): 492−499. doi:10.3969/2012jms.0106