

# 一种动态权重的台风集成预报方法

江应境<sup>1,2</sup>, 高山红<sup>1,2\*</sup>

(1. 中国海洋大学 海洋与大气学院, 山东 青岛 266100; 2. 物理海洋教育部重点实验室, 山东 青岛 266100)

**摘要:** 提出了一种动态权重的台风路径与强度集成预报方法, 根据前 4 个时刻 (24 h, 间隔 6 h) 的预报误差来滑动确定接下来预报所用成员及其权重。设计了 3 种权重形式 (最小误差、绝对偏差与相对偏差), 并利用 2013—2015 年 6 家气象机构的台风预报数据, 对台风路径与强度进行了时效为 24, 48 和 72 h 的预报应用检验。结果表明: 1) 动态权重集成方法在台风路径与强度预报上均有改进, 平均预报误差小于单一成员的预报误差。2) 路径预报以绝对偏差形式效果最佳, 24, 48 和 72 h 时效的预报误差减小 2.4%~40.4%; 强度预报以相对偏差形式效果最佳, 3 个时效的台风最大风速的预报误差减少 11.2%~49.9%, 而台风中心气压则为 11.9%~52.6%。3) 相对偏差动态集成预报能有效减小西北太平洋台风在东西方向上的偏差, 24 和 48 h 均方根误差分别为 92.5 和 146.7 km。

**关键词:** 集成预报; 台风; 动态权重; 预报误差

**中图分类号:** P732

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1002-3682(2018)03-0001-13

**doi:** 10.3969/j.issn.1002-3682.2018.03.001

台风(或热带气旋)是一种具有暖心结构的强烈的气旋性涡旋, 是海洋气象灾害中极具破坏力的一种天气系统。它导致的狂风与巨浪、暴雨与增水, 会对海岸工程造成严重破坏。因此, 台风的路径和强度预报技术一直受到高度关注。

在台风的预报中, 我们认为首要的是路径预报, 其次是强度预报。一旦有台风生成, 气象机构会发布预报, 如中央气象台 (China Meteorological Administration, CMA)、日本气象厅 (Japan Meteorological Agency, JMA)、韩国气象厅 (Korea Meteorological Administration, KMA)、美国联合台风预警中心 (Joint Typhoon Warning Center, JTWC)、欧洲中期天气预报中心 (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF) 等, 但它们都存在不同程度的预报误差<sup>[1-3]</sup>。如何利用这些预报结果并考虑它们的误差得到更佳的台风预报结果, 一个重要的解决途径就是集成预报。

对于集成预报, 国际上已有许多学者做过相关研究<sup>[3-5]</sup>。Goerss<sup>[6]</sup>利用 3 个全球模式和 2 个区域模式制作了多模式集成预报技术, 发现集成预报结果的平均误差小于每一个单一模式所作预报结果的误差。Kumar 等<sup>[7]</sup>应用多家的数值预报产品对加权集成预报进行了相关研究, 制作了太平洋 1998—2000 年的台风路径和强度的集成预报, 结果表明集合几家预报的结果要优于单一模式预报的结果。

在台风的预报方法中既有集成预报也有集合预报, 这 2 种预报方法是有区别的。集合预报 (Ensemble Forecasts) 最初是由 Leith 提出, 是在同一有效预报时间内作出的一组不同的预报结果<sup>[8]</sup>。经典的集合预报是从具有一定离散度的初值出发而进行数值预报并给出概率预报结果<sup>[9-10]</sup>。而集成预报 (Consensus Forecasts) 则是应用数学模型对同一种预报对象的多种预报工具或成员的预报结论进行综合集成, 从而得到一个统一的预报值<sup>[2, 11]</sup>。这些预报结果可以是不同模式的预报结果或不同的预报产品 (这些产品有时会包含

**收稿日期:** 2017-10-27

**资助项目:** 国家重点研发计划——海洋工程动力环境精细化预报与安全保障及评估技术研究 (2017YFC1404200) 和“两洋一海”区域超高分辨率多圈层延伸期预测系统 (2017YFC1404100); 广州市产学研协同创新重大专项——影响船舶航行安全的关键气象因子预报技术研究及应用 (201704020169)

**作者简介:** 江应境 (1993-), 男, 硕士研究生, 主要从事海洋气象灾害的数值模拟方面研究。E-mail: yingjingjiang@126.com

**\* 通讯作者:** 高山红 (1972-), 男, 教授, 博士, 主要从事海洋灾害天气的演变机理及数值模拟与预报技术方面研究。E-mail: gaosh@ouc.edu.cn

(陈 靖 编辑)

人工修正),也可以是集合预报的结果。在集合预报中,每个成员的准确率应大致相同,成员间的离散度同均值预报误差相近<sup>[9]</sup>;而集成预报使用多个预报结果,各成员准确率可以不同,其权重系数也不一样。

近年来国内有很多学者针对台风的集成预报做过相关研究<sup>[2,12-15]</sup>。刘宇迪等<sup>[17]</sup>提出最优决策法,将几种性能较好的预报方法进行集成,经初步试验发现预报效果较好。随着台风集成预报的研究发展,如何确定集成预报中各成员的权重成为研究的重点。其中,算术集成平均(或多模式集成平均)是简单的集成平均,各成员权重一致,效果也最差<sup>[1,17-18]</sup>;多元线性回归是通过挑选关系好的因素作为预报因子建立回归方程,这种方法优于算术集成平均,在集成方法中具有一定的优越性<sup>[1,16-17]</sup>;历史误差法是根据台风的历史预报数据来确定集成方程,其权重形式有多种,通常使用误差倒数法来确定各成员的权重系数<sup>[1,18]</sup>。

绝大多数集成预报方法需要依赖历史数据,参与集成的成员权重是固定的。我们设计了一种随预报时间推移而权重动态变化的集成预报方法,并利用实际台风个例来评估该集成方法的预报技巧。

## 2 方法与数据

### 2.1 台风数据来源

1) 台风路径与强度(最大风速和中心气压)预报数据为汕头市气象局提供的广东省气象局通用数据,包括国内外多家台风数值预报机构的预报产品。参与集成的成员有6家预报机构北京台风报(BABJ)、广州台风报(BCGZ)、欧洲数值预报中心报(ECMWF)、广州雷达报(GZRD)、日本台风报(RJTD)和集合预报(MEAN)。

2) 台风最佳路径数据由中国气象局热带气旋资料中心(<http://www.typhoon.org.cn>)提供,包括台风路径与最大风速和中心气压,时间间隔6 h。

### 2.2 台风个例

针对2013—2015年西北太平洋海域台风过程,依据如下标准选取台风个例:

- 1) 台风从发生到消亡持续时间达6 d或以上;
  - 2) 达到台风级别或发生和影响范围在中国台风48 h警戒线以内。
- 满足条件的共有21个台风,详细信息见表1。

表1 所选台风个例信息

Table 1 Information about the selected typhoon cases

序号	编号	名称	生消时间	最大风速 /m·s <sup>-1</sup>	中心气压 /hPa	最高级别
1	1307	苏力	2013-07-07—14	55	935	超强台风
2	1311	尤特	2013-08-08—18	60	925	超强台风
3	1312	潭美	2013-08-16—23	35	956	台风
4	1315	康妮	2013-08-25—31	25	988	强热带风暴
5	1319	天兔	2013-09-16—24	60	915	超强台风
6	1323	菲特	2013-09-29—10-07	45	945	强台风
7	1330	海燕	2013-11-03—11	78	890	超强台风

续表

序 号	编 号	名 称	生消时间	最大风速 /m · s <sup>-1</sup>	中心气压 /hPa	最高级别
8	1408	浣熊	2014-07-02—11	55	930	超强台风
9	1409	威马逊	2014-07-10—19	72	888	超强台风
10	1410	麦德姆	2014-07-17—26	42	955	强台风
11	1415	海鸥	2014-09-10—17	42	960	强台风
12	1416	凤凰	2014-09-17—24	28	982	强热带风暴
13	1504	美莎克	2015-03-26—04-06	65	910	超强台风
14	1506	红霞	2015-05-05—16	60	920	超强台风
15	1509	灿鸿	2015-06-29—07-12	55	935	超强台风
16	1510	莲花	2015-07-01—09	42	955	强台风
17	1511	浪卡	2015-07-03—18	42	955	强台风
18	1512	哈罗拉	2015-07-10—26	42	955	强台风
19	1513	苏迪罗	2015-07-30—08-12	68	905	超强台风
20	1515	天鹅	2015-08-14—27	55	930	超强台风
21	1524	巨爵	2015-10-12—21	55	935	超强台风

## 2.3 动态权重集成预报方法

### 2.3.1 基本思路

台风集成预报的基本思想是,假设有  $N$  家气象机构对同一个台风做出预报,预报结果分别为  $F_1, F_2, \dots, F_N$ ,每家气象机构的预报结果对应的权重系数为  $C_1, C_2, \dots, C_N$ ,则集成方程为

$$E = \sum_{i=1}^n C_i \times F_i, \quad (1)$$

式中,各家预报的权重系数要满足  $\sum_{i=1}^n C_i = 1$ 。

西北太平洋台风一般在远离中国大陆的外海生成。它一旦生成,各家预报机构每隔 6 或 12 h 做出 1 次预报(必要时会加密)。以 6 h 为预报时间间隔,每次预报记为 1 个时刻。台风生成后先不进行集成预报,但从第 5 个时刻开始,利用过去 24 h(4 个时刻)的预报数据与观测数据的误差作为依据来确定和调整集成预报方程中各成员所占的权重,依此类推,在时间上滑动,进行接下来每隔 6 h 的预报。在此过程中,由于成员及其权重皆是动态的,我们称之为动态权重集成预报方法。

在此方法中,同一个预报成员对于台风 A 的预报效果不会对台风 B 的预报产生影响,集成方程不再依赖于历史统计误差。具体做法:1)在每个时刻将所有成员前 4 个时刻的平均预报误差设为阈值,大于阈值的成员则将其剔除,剔除的成员集成权重为零;2)剔除误差较大的成员之后,剩余成员根据一定的关系确定权重系数,权重的大小取决于预报误差,这里权重与误差成反比。由于台风的路径预报优先于强度预报,因此主要依据路径预报误差来确定权重系数。我们采用 3 种不同的权重形式进行了研究。

### 2.3.2 权重形式

#### 1) 最小误差

台风路径预报的对象是台风中心气压所在位置的经纬度信息,已知地球上两点的经纬度,可以根据球面公式求出两点间的绝对距离。在预报时刻,根据各成员前 4 个时刻(24 h,间隔 6 h)的 24,48 和 72 h 时效的路径预报的平均绝对距离误差,分别选取误差最小的成员作为当前时刻各时效的预报结果,即在当前时刻的预报方程中该成员权重为 1,其他成员权重为 0。这就是最小误差动态权重集成预报方法,记为 CF-1(Consensus Forecast-1)。台风中心气压和最大风速的预报结果由路径预报的集成方程确定(见图 1 中 CF-1 的相关描述)。

#### 2) 绝对偏差

在最小误差集成预报的基础上,在每个预报时刻根据前 4 个时刻各家预报的 24,48 和 72 h 时效的平均绝对距离误差,剔除偏差较大的成员之后,将剩余成员根据距离反比确定权重得到集成方程,即在参与集成的成员中,将各成员绝对距离偏差的倒数所占的百分比确定为权重系数,利用它可以得到当前时刻各时效的经纬度预报结果(见图 1 中 CF-2 的相关描述)。此方法称为绝对偏差动态权重集成预报方法,记为 CF-2(Consensus Forecast-2)。台风中心气压和最大风速的预报与 CF-1 一样,由路径预报的集成方程确定。

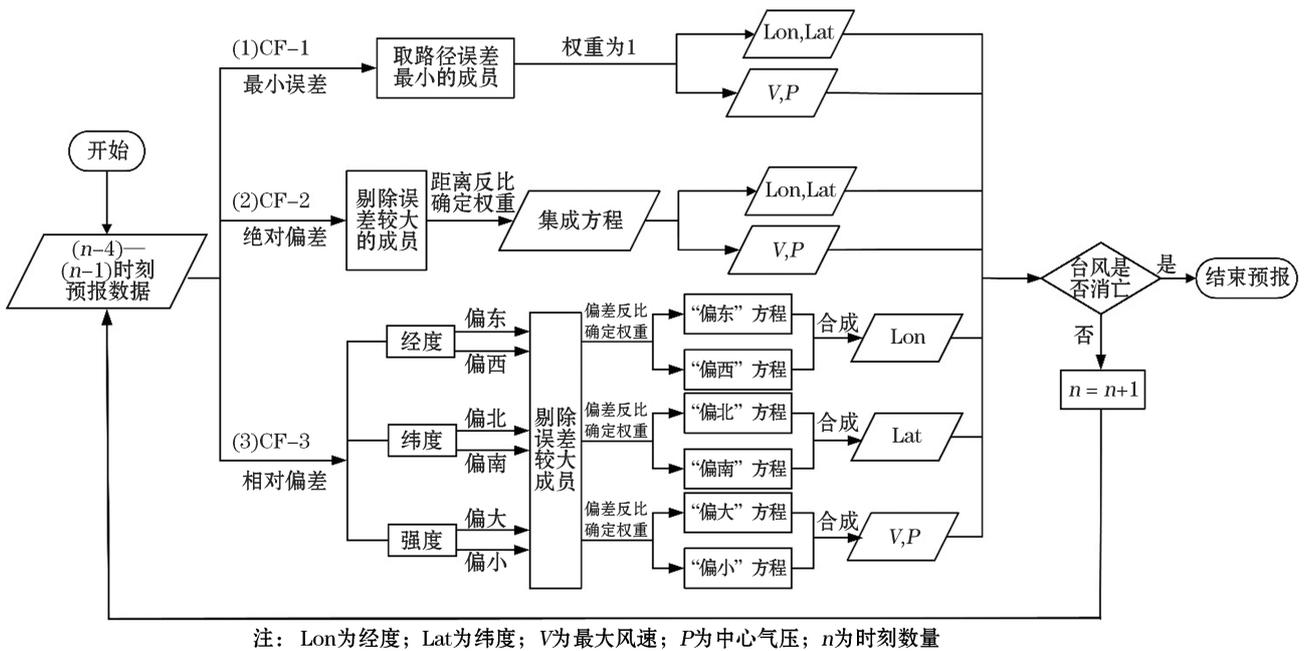


图 1 集成预报流程图

Fig.1 Flowchart of consensus forecast

#### 3) 相对偏差

对于台风发生频率最大的西北太平洋的台风路径预报来说,误差为几十甚至一百多千米,偏东可能仍在海上,而偏西可能就已经登陆了,这是完全不同的 2 种结果。因此,在台风的路径预报中,除了考虑距离上的误差,也应该考虑方向上的误差,这一点前人较少涉及。因此,可以将绝对距离分解为纬向距离和经向距离,分别记为  $\Delta X$  和  $\Delta Y$ 。当  $\Delta X$  和  $\Delta Y$  大于零时,表示预报位置偏东和偏北,反之,则表示预报位置偏西和偏南。我们的目的是想纠正或减小偏东或偏西的误差。

以经度预报为例,在预报时刻,将前 4 个时刻各家预报的结果分为偏东和偏西 2 组,每组成员在剔除误差较大成员之后,根据纬向偏差  $\Delta X$  取反比确定权重分别得到“偏东”和“偏西”的 2 个集成预报方程,由这 2 个方程得到的 2 个预报结果进一步合成得到最终经度预报结果。我们将这种权重形式的预报方法称为相对偏差动态权重集成预报方法,记为 CF-3(Consensus Forecast-3)。纬度的预报方法与经度相同。

类似地,对于强度预报,将中心气压和最大风速分为偏大和偏小 2 组,剔除误差较大成员得到“偏大”和“偏小”2 个集成方程之后,将 2 个预报结果合成得到当前时刻的预报值(见图 1 中 CF-3 的相关描述)。

### 3 动态权重集成预报方法的应用检验

#### 3.1 台风路径

表 2 列出了 3 种不同形式的动态权重集成预报方法对于台风路径的平均预报误差及改进结果。从 CF-1、CF-2 和 CF-3 相对于各成员预报的改进百分率中可知,除了 24 h 预报的 CF-1 和 CF-3 的预报误差相对于平均预报误差最小的 ECMWF 分别增加了 4.7% 和 5.7%,3 种权重形式的集成预报结果比各成员的单一预报都有所改进,误差减小幅度在 2.4%~40.4%。可见此动态权重的集成方法对于路径预报而言,改进效果明显。

表 2 集成预报的路径误差及其改进效果  
Table 2 Track error and improvement effect by using consensus forecasts

时效 /h	集成 形式	误差 /km	集成预报相对于各参与成员的改进百分率/%					
			BABJ	BCGZ	ECMWF	GZRD	MEAN	RJTD
24	CF-1	51.3	+8.1	+18.5	-4.7	+18.5	+36.0	+12.9
	CF-2	47.7	+14.4	+24.1	+2.4	+24.1	+40.4	+18.9
	CF-3	51.8	+7.2	+17.7	-5.7	+17.7	+35.4	+12.0
48	CF-1	78.7	+14.4	+16.8	+5.2	+19.7	+21.6	+16.8
	CF-2	78.3	+14.8	+17.3	+5.6	+20.1	+22.0	+17.2
	CF-3	81.6	+11.2	+13.7	+1.6	+16.7	+18.6	+13.7
72	CF-1	114.7	+9.1	+8.8	+3.9	+12.1	+8.0	+8.1
	CF-2	109.8	+13.0	+12.8	+8.1	+15.9	+12.0	+12.0
	CF-3	121.4	+3.8	+3.5	+1.6	+7.0	+2.6	+2.7

由表 2 可知,在 3 种权重形式中,24,48 和 72 h 的预报都以 CF-2(绝对偏差集成预报)的平均预报误差最小,分别为 47.7,78.3 和 109.8 km。各时效 CF-2 的改进效果:1)误差减小幅度最小分别为 2.4%,5.6% 和 8.1%(均相对于 ECMWF);2)误差减小幅度最大分别为 40.4%(相对于 MEAN)、22.0%(相对于 MEAN) 和 15.9%(相对于 GZRD)。

考虑了方向偏差的 CF-3(相对偏差集成预报)在路径预报上,其绝对距离误差与 CF-2 相比并不占优势,但分析表 3 中 3 种方法在 3 个时效中路径集成预报在东西方向上偏差的均方根误差可知,CF-3 在 24 和 48 h 预报中东西方向上的误差要明显小于另外 2 种形式的预报结果,均方根误差相对于 CF-2 减小了 5.4 km 和 8.2 km;在 72 h 预报中,CF-2 比 CF-3 的结果略好,但它们相差很小。可见,在 24 h 和 48 h 预报中,CF-3 能有效减小西北太平洋台风在东西方向上的路径偏差。

表 3 集成预报在东西方向上的路径误差比较

Table 3 Comparison of the track errors in west and east directions by using consensus forecast

时效/h	均方根误差/km		
	CF-1	CF-2	CF-3
24	102.6	97.9	92.5
48	155.1	154.9	146.7
72	228.9	197.0	201.1

图 2~图 4 分别是 CF-1、CF2 和 CF-3 的预报误差频数分布直方图。CF-1 的 3 个时效的路径预报误差最大区间分别为 $[0, 125]$ 、 $[0, 150]$ 和 $[25, 175]$  km,对应频率分别为:90.65%、82.20%和 75.59%;CF-2 的

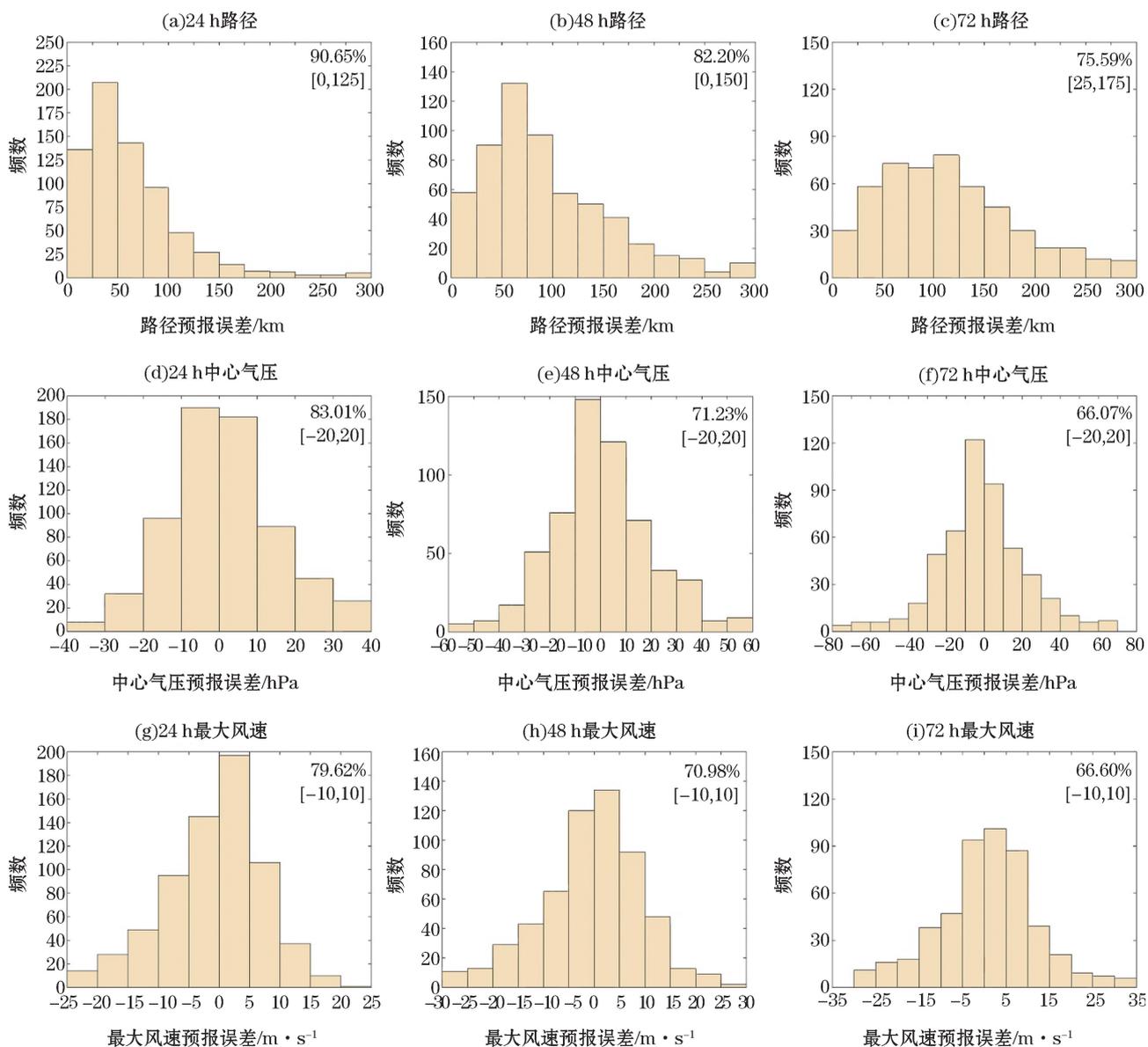


图 2 CF-1 预报误差分布

Fig.2 Forecast error distribution by using CF-1

3 个时效的路径预报误差最大区间则分别位于 $[0, 125]$ ,  $[25, 150]$ 和 $[25, 150]$  km, 对应的频率分别为 91.65%, 76.27%和 67.52%; CF-3 的 3 个时效的路径预报误差最大区间为 $[0, 125]$ ,  $[25, 150]$ 和 $[25, 150]$  km, 对应频率分别为 90.65%, 76.40%和 64.68%。3 种形式的集成预报方法的路径预报误差分布基本一致。

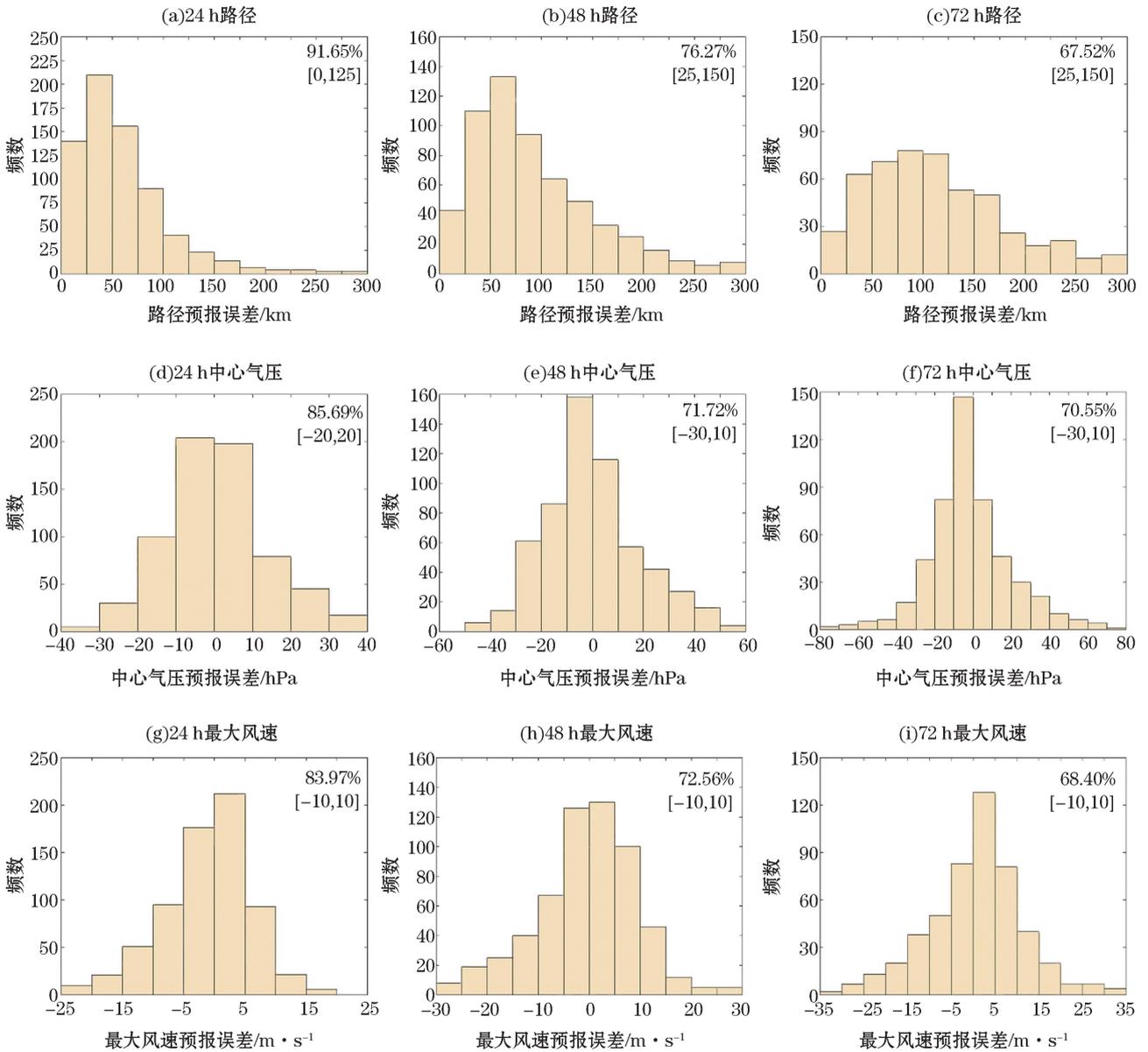


图 3 CF-2 预报误差分布

Fig.3 Forecast error distribution by using CF-2

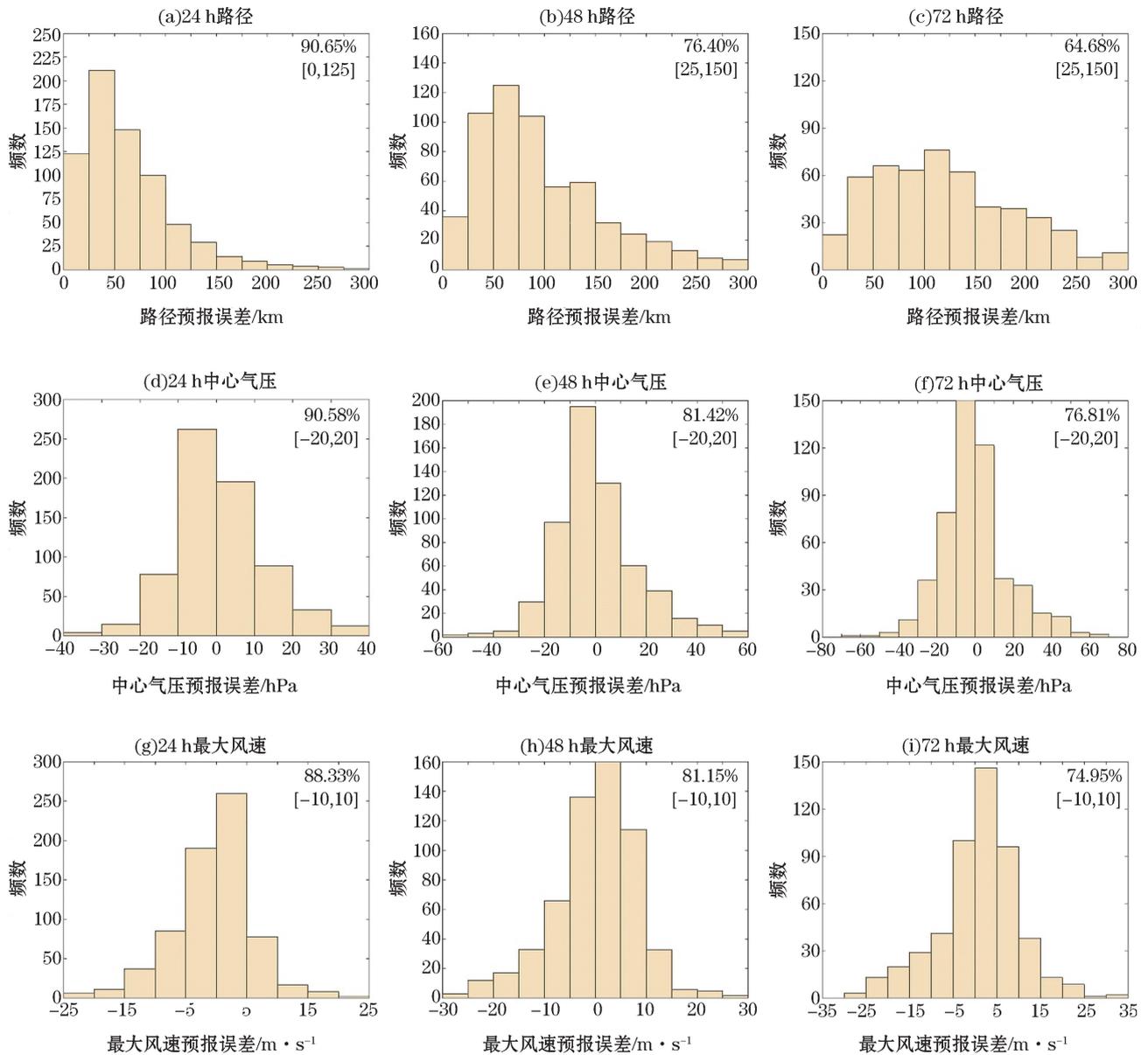


图4 CF-3 预报误差分布图

Fig.4 Forecast error distribution by using CF-3

### 3.2 台风强度

对比表4和表5中动态权重集成预报方法对于台风最大风速和中心气压的平均预报误差及改进效果可知,3种形式的集成结果对于多数成员的单一预报都有改进。其中,以CF-3的预报误差最小,24,48和72时效台风中心附近最大风速预报的改进效果:1)误差减小幅度最小分别为11.2%(相对于BCGZ)、15.0%(相对于BABJ)和19.9%(相对于BABJ);2)误差减小幅度最大分别为40.6%(相对于ECMWF)、44.8%(相对于MEAN)和49.9%(相对于MEAN)。CF-3预报的台风中心最低气压各时效的改进效果:1)误差减小幅度最小分别为11.9%,18.9%和17.2%(均相对于BABJ);2)误差减小幅度最大分别为52.4%,50.4%和52.6%(均相对于MEAN)。

表 4 集成预报的最大风速误差及其改进效果

Table 4 The maximum wind speed error and the improvement effect by using consensus forecast

时效 /h	集成 形式	误差 /m·s <sup>-1</sup>	集成预报相对于各集合成员的改进百分率/%					
			BABJ	BCGZ	ECMWF	GZRD	MEAN	RJTD
24	CF-1	8.0	-46.3	-48.2	+1.0	-5.8	+21.2	-46.3
	CF-2	6.5	-18.4	-20.0	+19.8	+14.4	+36.2	-18.4
	CF-3	4.8	+12.3	+11.2	+40.6	+36.6	+52.7	+12.3
48	CF-1	8.8	-26.9	-25.6	+2.0	-2.5	+17.6	-16.7
	CF-2	7.9	-13.4	-12.3	+12.4	+8.3	+26.4	-4.3
	CF-3	5.9	+15.0	+15.9	+34.4	+31.3	+44.8	+21.8
72	CF-1	8.7	-26.0	-24.4	+1.5	-6.0	+21.2	-7.8
	CF-2	6.9	-1.0	+0.3	+21.0	+15.1	+36.8	+13.6
	CF-3	5.5	+19.9	+21.0	+37.4	+32.7	+49.9	+31.5

表 5 集成预报的中心气压误差及其改进效果

Table 5 The central pressure error and the improvement effect by using consensus forecast

时效 /h	集成 形式	误差 /hPa	集成预报相对于各集合成员的改进百分率/%					
			BABJ	BCGZ	ECMWF	GZRD	MEAN	RJTD
24	CF-1	15.9	-48.6	-47.9	+4.2	17.9	+19.7	-23.8
	CF-2	12.9	-20.0	-19.4	+22.6	+4.8	+35.2	+0.1
	CF-3	9.4	+11.9	+12.3	+43.2	+30.1	+52.4	+26.6
48	CF-1	16.9	-22.0	-21.7	+14.5	-10.8	+25.4	+4.2
	CF-2	14.9	-7.3	-7.0	+24.8	+2.6	+34.4	+15.8
	CF-3	11.2	+18.9	+19.1	+43.2	+26.4	+50.4	+36.3
72	CF-1	17.3	-27.1	-26.5	+17.0	-16.3	+27.2	+6.4
	CF-2	14.2	-4.3	-3.8	+31.9	+4.6	+40.3	+23.2
	CF-3	11.2	+17.2	+17.6	+45.9	+24.2	+52.6	+39.0

分析表 4 和表 5 中的 CF-1 和 CF-2 相对于各成员预报的改进效果可知,CF-1 和 CF-2 相对于 BABJ、BCGZ 和 RJTD 的预报误差是增大的,增大范围为 3.8%~48.6%,这一点是有别于路径预报的。而 CF-3 的强度预报结果在 3 个时效相对于每一个成员预报效果都有所改进,最大风速和中心气压预报误差分别减小了 11.2%~49.9%和 11.9%~52.6%,其预报效果明显优于另外 2 种形式。其原因可能是根据路径预报得到的集成方程并不能很好地适用于强度的预报,根据强度预报误差确定集成方程的 CF-3 预报效果相对于 CF-1 和 CF-2 显著提高可以证实这一点。

对于本文选取的 21 个台风个例 3 个时效的中心气压预报误差,CF-1 的最大区间分别为[-20, 20] hPa,对应频率分别为 83.01%,71.23%和 66.07%;CF-2 的最大区间分别位于[-20, 20] hPa,[-30, 10] hPa 和[-30, 10] hPa,对应的频率分别为 85.69%,71.72%和 70.55%;CF-3 的最大区间均位于[-20, 20] hPa,对应频率分别为 90.58%,81.42%和 76.81%。

对于最大风速,CF-1、CF-2 和 CF-3 的 3 个时效的预报误差的最大区间均位于[-10, 10] m/s,对应的频率:CF-1 为 79.62%,70.98%和 66.60%;CF-2 为 83.97%,72.56%和 68.40%;CF-3 为 88.33%,81.15%和 74.95%。可见对于强度预报,CF-3 的预报区间较 CF-1 及 CF-2 更为稳定,整体预报效果也偏好。

### 3.3 典型个例分析

选取 1410 号台风“麦德姆”48 h 的预报结果和 1513 号台风“苏迪罗”72 h 的预报结果进行分析,其路径如图 5 所示。观察图 5a 中的①段路径可以发现,CF-1 和 CF-2 的预报路径偏东程度较大,CF-3 预报的台风位置虽然在 2014-07-22T06:00 距离真实位置较远,但是台风整体移动的趋势却更加接近真实情况,其东西方向上的误差也更小。此外,由图 5a 中的②段路径可以看到在台风登陆后,集成预报的路径有所偏东,图中体现的 CF-2 和 CF-3 预报结果很接近,都比 CF-1 好。

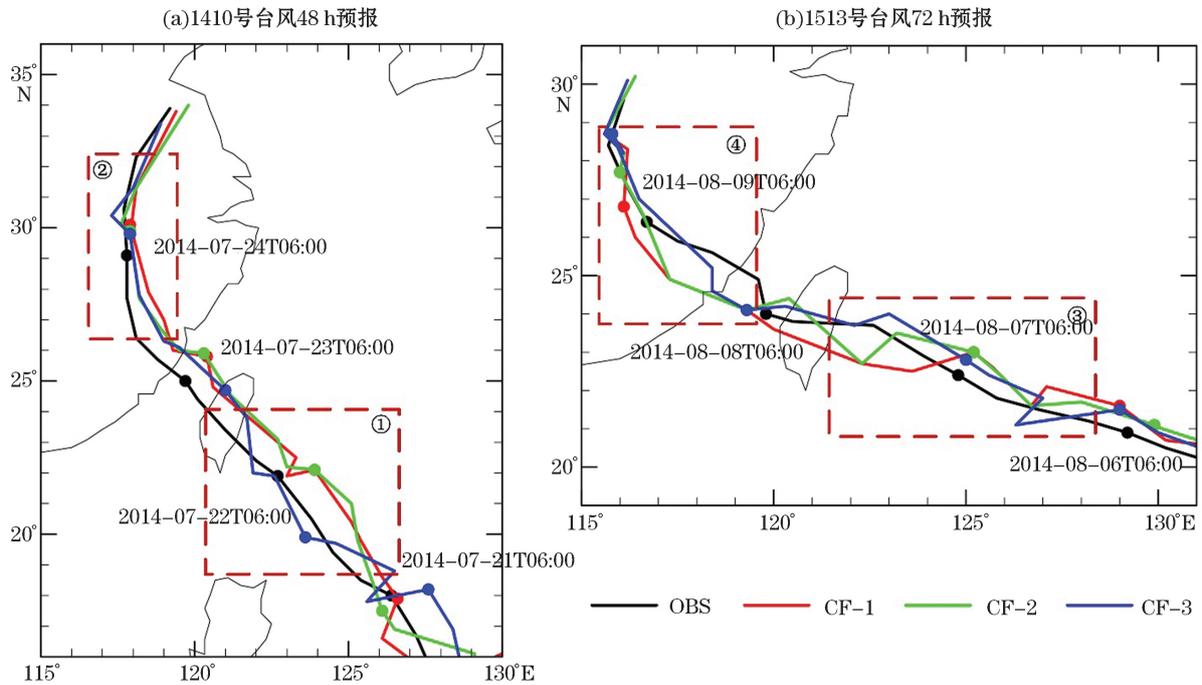


图 5 台风路径集成预报图

Fig.5 Consensus forecast map of typhoon track

分析图 5b 中的③段路径可知,CF-3 预报的台风移动趋势与真实情况比较接近,且逐渐靠近真实路径,而 CF-1 和 CF-2 相对于 OBS 则有所偏离。从图 5b 中④段路径还可以发现,在台风登陆后集成预报位置普遍偏西,但是 CF-3 偏西程度最小,且在台风一登陆后就表现出向 OBS 靠近的趋势。

表 6 和表 7 分别是图 5a 和 5b 对应时间段的台风个例集成预报各要素的均方根误差。由表 6 可知,1410 号台风 48 h 预报以 CF-2 的预报偏差最小,CF-3 对于路径预报的偏差较大。其原因可以从图 5a 中找到:在某些预报时刻(2014-07-21T06:00 和 2014-07-22T06:00),CF-3 的预报位置偏离真实值较远,这几个时刻的较大偏差可能是造成平均误差偏大的原因。但是,如果比较表 6 中 3 种形式集成路径的纬向距离的均方根误差,可知 CF-3 以 86.7 km 的纬向偏差明显小于 CF-1 的 108.4 km 和 CF-2 的 115.2 km,可见 CF-3 可以明显纠正西北太平洋台风的東西向偏差。表 6 中 1410 号台风 48 h 预报的最大风速和中心气压的均方根误差以 CF-3 最小,分别为 5.8 m/s 和 14.4 hPa,预报结果优于 CF-1 和 CF-2 及各成员预报结果。

由表 7 中绝对距离的均方根误差(已剔除 2015-08-09T06:00)可知,在不考虑 2015-08-09T06:00 时,1513 号台风 72 h 路径预报以 CF-3 最佳,绝对距离和纬向距离分别为 79.5 和 124.3 km,它们的均方根误差均小于 CF-1 和 CF-2 及其他各家预报。CF-3 预报的最大风速和中心气压分别以 5.2 m/s 和 11.4 hPa 仅次于 GZRD 的 5.1 m/s 和 8.1 hPa,相较于 CF-1 和 CF-2 预报效果有所提高。

表 6 1410 号台风 48 h 预报均方根误差

Table 6 The RMSE of the 48 h forecast of typhoon No.1410

均方根误差	CF-1	CF-2	CF-3	BABJ	BCGZ	ECMWF	GZRD
绝对距离/km	89.5	80.7	119.4	81.2	77.9	93.8	154.5
纬向距离/km	108.4	115.2	86.7				
最大风速/ $m \cdot s^{-1}$	12.2	10.1	5.8	10.9	11.4	11.0	9.5
中心气压/hPa	22.1	19.5	14.4	20.2	21.4	16.1	16.5

注:空白表示无数据

表 7 1513 号台风 72 h 预报均方根误差

Table 7 The RMSE of the 72 h forecast of typhoon No.1513

均方根误差	CF-1	CF-2	CF-3	BABJ	BCGZ	ECMWF	GZRD
绝对距离/km	92.8	83.4	79.5	95.2	94.5	109.0	156.9
纬向距离/km	152.6	141.1	124.3				
最大风速/ $m \cdot s^{-1}$	5.8	5.3	5.2	5.7	5.7	7.7	5.1
中心气压/hPa	16.5	15.8	11.4	12.7	12.7	22.7	8.1

注:空白表示无数据

在这 2 次典型个例中,无论是路径预报的距离误差,还是强度预报的最大风速与中心气压,CF-3 预报结果的均方根误差大致小于 CF-1、CF-2 及大多数成员的单一预报。此外,使用相对偏差形式的 CF-3 相较于 CF-1 和 CF-2 可以明显改进台风路径的偏东或偏西,进而对于判断台风的登陆位置有所帮助。

## 4 结 论

针对西北太平洋台风的预报,提出一种动态权重的集成预报方法,采用了 3 种不同形式的动态权重(最小误差、绝对偏差与相对偏差)。通过对西北太平洋 21 例台风个例的集成预报应用检验,得到结论:

1)使用动态权重的集成预报方法对于台风的路径预报和强度预报都有改进,3 种不同的权重形式相对于大多数成员的单一预报结果都有不同程度的提高。

2)路径预报以使用绝对偏差形式的集成效果最佳,平均误差相对于单个成员最低减小 2.4%,最高减小 40.4%;从纬向偏差上看,使用相对偏差形式的集成方法在 24 和 48 h 预报上,均方根误差比最小误差集成方法小 8.1 和 8.4 km,比绝对偏差集成方法小 5.4 和 8.2 km。强度预报以使用相对偏差形式的集成效果最佳:台风最大风速和中心气压的平均误差相对于单个成员最低分别减小了 11.2%和 11.9%,最高分别减小了 49.9%和 52.6%。

3)典型个例预报分析表明,相对偏差动态权重集成方法在某些时刻路径预报的距离偏差可能较大,但其对于台风整体移动趋势的预报却比较接近真实情况。这种权重形式的动态集成方法能明显减小台风路径偏东或偏西的预报误差,从而会改善台风是否登陆的预报效果。

**参考文献 (References):**

- [1] ZHOU W Y, ZHI X F. Multimodel ensemble forecasts of the TC tracks and intensity over the western Pacific during the summer of 2009 [J]. *Journal of the Meteorological Sciences*, 2012, 32(5): 492-499. 周文友, 智协飞. 2009 年夏季西北太平洋台风路径和强度的多模式集成预报[J]. *气象科学*, 2012, 32(5): 492-499.
- [2] XIONG C C, PAN X, ZHAO Q, et al. RBF neural network for weather forecast based on multi-model integration[J]. *Journal of Tianjin University of Science & Technology*, 2014, 29(1): 75-78. 熊聪聪, 潘璇, 赵奇, 等. 多模式集成的 RBF 神经网络天气预报[J]. *天津科技大学学报*, 2014, 29(1): 75-78.
- [3] DALCHER A, KALNAY E, HOFFMAN R N. Medium range lagged average forecast[J]. *Monthly Weather Review*, 1988, 116(2): 402-416.
- [4] CHEUNG K K W, CHAN J C L. Ensemble forecasting of tropical cyclone motion using a barotropic model: part I perturbations of the environment[J]. *Monthly Weather Review*, 1999a, 127(6): 1229-1243.
- [5] CHEUNG K K W, CHAN J C L. Ensemble forecasting of tropical cyclone motion using a barotropic model: part II perturbations of the vortex[J]. *Monthly Weather Review*, 1999b, 127(6): 2617-2640.
- [6] GOERSS J S. Tropical cyclone track forecasts using an ensemble of dynamical models[J]. *Monthly Weather Review*, 2000, 128(4): 1187-1193.
- [7] KUMAR T S V V, KRISHNAMURT T N. Multimodel superconsensus forecasting of tropical cyclones in the Pacific[J]. *Monthly Weather Review*, 2003, 131(3): 574-583.
- [8] LEITH C E. Theoretical skill of Monte Carlo forecasts[J]. *Monthly Weather Review*, 1974, 102(6): 409-418.
- [9] DU J. Present situation and prospects of ensemble numerical prediction[J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2002, 13(1): 16-28. 杜军. 集合预报的现状和前景[J]. *应用气象学报*, 2002, 13(1): 16-28.
- [10] YANG X S. The new development and the outlook of the operational ensemble prediction system. *Meteorological Monthly*, 2001, 27(6): 3-9. 杨学胜. 业务集合预报系统的现状及展望[J]. *气象学报*, 2001, 27(6): 3-9.
- [11] ZHI X F, CHEN W. New achievements of international atmospheric research in THORPEX program[J]. *Transactions of Atmospheric Sciences*, 2010, 33(4): 504-511. 智协飞, 陈雯. THORPEX 国际科学研究新进展[J]. *大气科学学报*, 2010, 33(4): 504-511.
- [12] WANG Q L, LIU J J, ZHANG L F. The study on ensemble prediction of typhoon track[J]. *Journal of the Meteorological Sciences*, 2012, 32(2): 137-144. 王秋良, 刘家峻, 张立凤. 台风路径集合预报试验[J]. *气象科学*, 2012, 32(2): 137-144.
- [13] YUAN J N, WAN Q L, HUANG Y Y, et al. The experiments of ensemble prediction of the track of tropical cyclone in South China Sea [J]. *Journal of Tropical Meteorology*, 2006, 22(2): 105-112. 袁金楠, 万齐林, 黄燕燕, 等. 南海热带气旋路径集合预报试验[J]. *热带气象学报*, 2006, 22(2): 105-112.
- [14] LI J Y, DING Y G, SHI J E. A forecast test of typhoon track by means of consensus forecast techniques[J]. *Journal of Tropical Meteorology*, 1998, 14(3): 258-262. 李建云, 丁裕国, 史久恩. 台风路径预报集成方法的一个试验[J]. *热带气象学报*, 1998, 14(3): 258-262.
- [15] ZHOU X Q, ZHANG X Z, DUAN Y H, et al. The analysis of ensemble forecasting of tropical cyclone motion in 2000[J]. *Scientia Meteorology sinica*, 2003, 23(4): 410-417. 周霞琼, 张秀珍, 端义宏, 等. 滞后平均法(LAF)在热带气旋路径集合预报中的应用[J]. *气象科学*, 2003, 23(4): 410-417.
- [16] LIU Y D, WANG B, HOU Z M. Application of optimum decision method to typhoon track forecasting[J]. *Journal of Tropical Meteorology*, 2003, 19(2): 219-224. 刘宇迪, 王斌, 侯志明. 最优决策法在台风路径集成预报中的运用[J]. *热带气象学报*, 2003, 19(2): 219-224.
- [17] ZHANG S F, GAO S Z, LI Y A. Application of consensus method to forecast of tropical cyclones[J]. *Meteorological Sciences and Technology*, 2007, 35(2): 161-165. 张守峰, 高拴柱, 李月安. 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*, 2007, 35(2): 162-165.
- [18] TU X P, YAO R S, ZHANG C H, et al. Operational ensemble forecasting and analysis of tropical cyclones over the Western North Pacific (including the South China Sea)[J]. *Journal of Tropical Meteorology*, 2012, 28(2): 204-210. 涂小萍, 姚日升, 张春花, 等. 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*, 2012, 28(2): 204-210.

## A Consensus Forecast Method for Typhoon Based on Dynamic Weights

JIANG Ying-jing<sup>1,2</sup>, GAO Shan-hong<sup>1,2</sup>

(1. *College of Oceanic and Atmospheric Sciences, Ocean University of China, Qingdao 266100, China;*

2. *Key Laboratory of Oceanography, Ministry of Education, Qingdao 266100, China*)

**Abstract:** A consensus forecast method for the track and intensity of typhoon based on dynamic weights is proposed, by which the members to be used in the next forecasting and their weights are determined at every moment according to the forecast errors at the first four times (24h, 6h interval). Three forms of weights (least error, absolute deviation and relative deviation) are designed, and by using the typhoon forecast data of 6 meteorological organizations from 2013 to 2015, the forecasts of the typhoon track and intensity with a time limit of 24h, 48h and 72h are tested. The results show that: 1) With this dynamic weight consensus forecast method the forecasts of both track and intensity of typhoon can be improved, with the average forecasting error being smaller than that of a single member; 2) For the forecast of typhoon track, it is better to use the consensus forecast-2 (CF-2) which takes the absolute deviation form as the weight, making the forecast error of 24h, 48h and 72h time limits reduced by 2.4%~40.4%. For the forecast of typhoon intensity, the consensus forecast-3 (CF-3) which uses the relative deviation form as the weight can achieve the best effect, making the forecast error of the above three time limits reduced by 11.2%~49.9% for the maximum wind speed of typhoon and by 11.9%~52.6% for the central pressure of typhoon; 3) The consensus forecast-3 (CF-3) can effectively reduce the deviation of typhoon in the Northwest Pacific in west-east direction, with the root-mean-square error (RMSE) of the forecasts in 24h and 48h time limits being 92.5 km and 146.7 km, respectively.

**Key words:** consensus forecasts; typhoon; dynamic weights; forecast error

**Received:** October 27, 2017