

基于集合 Kalman 滤波数据同化与偏差修正的热带气旋强度集合预报研究^{* 1}

黄小刚^{1,2} 费建芳² 陆汉城² 韩 锐³

HUANG Xiaogang^{1,2} FEI Jianfang² LU Hancheng² HAN Rui³

1. 中国科学院大气物理研究所大气科学与地球流体力学数值模拟国家重点实验室,北京,100029
2. 解放军理工大学气象学院,南京,211101
3. 南京军区空军气象中心,南京,210018

1. *State Key Laboratory of Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China*

2. *Institute of Meteorology, PLA University of Science & Technology, Nanjing 211101, China*

3. *Weather Center of PLA Nanjing Military Area Air Command, Nanjing 210018, China*

2007-10-18 收稿,2008-03-05 改回.

Huang Xiaogang, Fei Jianfang, Lu Hancheng, Han Rui. 2010. The ensemble forecasting of tropical cyclone intensity based on EnKF data assimilation and bias-correction. *Acta Meteorologica Sinica*, 68(1):79-87

Abstract The techniques of ensemble forecasting based on EnKF(Ensemble Kalman Filter) and bias-correction are applied to predict the tropical cyclone intensity by using MM5 model. Adopting the Anthes-Kuo, Grell, and Betts-Miller cumulus parameterization schemes, and high-resolution Blackadar, Burk-Thompson, and MRF PBL process parameterization schemes, nine groups model configuration are designed, and 45-, 60- and 75-min forecasts are conducted for each situation. With the "mirror imaging method", 18 different initial conditions are obtained. Taking the "Rankine vortex" as observational data and the 18 different initial conditions as the background ensemble, the EnKF data assimilation with EnSRF arithmetic are then carried out. Utilizing the 18 data assimilation results as the ensemble forecasting initial fields and taking 9 different model configurations, 72-h forecast is carried out. Two experiments are designed; one is the ensemble forecasting based on EnKF data assimilation, which is used to compare with non-assimilation ensemble forecasting, and 6 typhoon cases occurred in 2004 are selected. The other uses the bias-correction method to modify the ensemble forecasting results, in which 16 typhoon cases occurred in 2003 and 2004 are selected. So we can discuss the impact of bias correction. The results of the first experiment show that because the MM5 model has deficiencies in intensity forecast, the ensemble forecasting system with data assimilation has made little improvement compared with non-assimilation. The results of the second experiment show that, as can be seen from the RSS index, the bias-corrected intensity forecast makes great improvement compared with that of uncorrected. On the average, the absolute error of intensity forecast is reduced obviously than that of control prediction in every forecast time. The error for 48- and 72-h are 18 hPa, and 11 hPa respectively, which minishes 5 hPa forecast error at 48-h. By bias correction, the error of intensity ensemble forecast sample mean is reduced, and the PDF mean is closer to the theoretical value. Therefore, the quality of the intensity ensemble forecast results, particularly forecast probability, is increased. So the sample variance is reduced and a more reasonable intensity probability forecasting is obtained.

Key words Tropical cyclone, Ensemble forecast, Intensity forecast, Bias-correction

* 资助课题:中国科学院大气物理研究所大气科学和地球流体力学国家重点实验室开放课题(2709),中国气象局上海台风研究所开放课题(2006STB02)。

作者简介:黄小刚,主要从事热带气旋预报和数值模拟的研究。E-mail:huang. x. g@163. com

摘要 采用基于集合 Kalman 滤波数据同化和偏差修正方法的集合预报技术来研究热带气旋的强度预报问题。集合预报系统考虑初值误差和模式误差,利用 MM5 中尺度模式,采用 Anthes-kuo、Grell 和 Betts-Miller 等积云参数化方案和 High-resolution Blackadar、Burk-Thompson、MRF 等边界层过程的 9 组不同的组合,分别进行 45、60 和 75 min 的短时预报。对 9 个预报结果采用“镜像法”,得到 18 个集合成员。将蓝金涡旋作为同化的观测场,18 个集合成员作为集合 Kalman 滤波的初始背景集合,采用 ENSRF 算法和逐点局地分析算法进行同化。同化后的结果作为集合预报的初值,预报过程对模式参数采用前述 9 种组合,进行 72 小时预报。通过求取偏差系数对预报结果进行修正,减小模式系统误差。选 2003—2004 年 16 个台风过程作为预报个例,讨论偏差修正前后对预报结果的影响。实验结果表明,基于集合 Kalman 滤波数据同化的热带气旋集合预报相对于非同化的集合预报对路径预报的改进效果优于强度预报。平均而言通过偏差修正,强度集合预报的潜力得到挖掘,绝对误差明显减小,通过偏差修正减小了强度集合预报均值的误差,进而使得预报概率密度函数均值向理论值靠近,从而提高了概率预报的精度和合理性,因此基于集合预报的偏差修正分析方法,是改善热带气旋强度预报水平的有效途径。

关键词 热带气旋, 集合预报, 强度预报, 偏差修正

中图法分类号 P457.8 P456.7

1 引言

人们对热带气旋路径预报的关注往往甚于对热带气旋强度的预报,一方面热带气旋是否登陆本地是最直观的预报需要,另一方面现有业务模式强度预报的可信度还不能令人满意。随着中国沿海经济的发展,由台风造成的灾害损失将越来越大,即使台风路径预报较正确,但由于对其强度变化估计不足,损失也难以减轻(端义宏等,2005),因此,正确预报热带气旋的强度,对做好防台工作具有重要的意义。

近年来尽管数值预报模式的发展取得了长足的进步,但在热带气旋强度预报领域,统计预报方法仍然比数值预报方法具有更高的预报精度(Emanuel, et al, 2004)。当前热带气旋强度预报统计模式以 SHIPS (Statistical Hurricane Intensity Prediction Scheme, DeMaria, et al, 1994, 1999) 模式为主, SHIPS 模式以气候、持续以及当前大气环境信息为预报因子,采用双线性回归方法经充足的历史样本训练后,能够得到优于数值模式的预报结果。然而这并非意味着数值模式在强度预报方面失去了预报能力,其主要原因还在于数值模式对热带气旋强度变化过程描述能力的不足和对不确定初值的敏感性,这两方面的原因大大降低了模式对热带气旋强度的预报能力。本文采用集合预报的方法来改进数值预报模式对热带气旋强度预报的能力。

目前较为成熟的集合预报方案如增长模繁殖法(Toth, et al, 1993; Tracton, et al, 1993)、特征向量法(Molteni, et al, 1996)等,都只是在中高纬度中期集合预报中取得了较大的成功,而针对热带气旋特点的集合预报研究还处于初始阶段(Cheung, et al,

1999; Zhang, et al, 1999; 周霞琼等, 2003)。目前主要的方法可分为两类:一是多模式的集合(Elsberry, et al, 2000; Goerss, 2000),目标是通过平均,减小单个模式的误差,该方法在热带气旋路径的短期预报中取得了较好的效果(Fraedrich, et al, 1987; Leslie, et al, 1990);另一种方法是扰动初值,采用单个模式进行预报(Cheung, 2001),可有效减小初值带来的误差。

由于初始场不能完全反映热带气旋真实信息,因此在进行热带气旋的数值预报时都需要进行初值修正,目前试验中多采用变分方法。然而,由于集合卡尔曼滤波(缩写 EnKF)数据同化(Evensen, 1994)方法具有的无需伴随、较低的计算成本和“流变”的误差协方差估计等优势,使它在与变分同化的竞争中脱颖而出。同时由于 EnKF 数据同化方法引入了集合的概念,因此也成为目前初值扰动技术中发展最快的一个方案(马旭林等, 2008)。

对热带气旋强度的数值预报而言,采用集合预报的方法能够减小随机误差,但是,由于数值模式在强度预报方面的缺陷,因此模式的系统误差仍然是误差的主要来源,还需要对集合预报结果进行后处理,以期减小模式的系统误差。

2 试验方案

2.1 集合预报方法

采用 MM5V3 模式,在考虑扰动热带气旋初始位置、强度以及环境场的情况下,同时考虑模式误差,设计基于集合 Kalman 滤波数据同化的热带气旋集合预报方案。Kalman 滤波的分析方程可以写为

$$\mathbf{x}^a = \mathbf{x}^f + \mathbf{K}(\mathbf{y} - \mathbf{H}\mathbf{x}^f) \quad (1)$$

其中, \mathbf{x}^f 为初猜场, \mathbf{x}^a 为分析场, \mathbf{y} 是观测向量, \mathbf{H} 为观测算子, \mathbf{K} 被称为 Kalman 增益矩阵

$$\mathbf{K} = \mathbf{P}^f \mathbf{H}^T (\mathbf{H} \mathbf{P}^f \mathbf{H}^T + \mathbf{R})^{-1} \quad (2)$$

其中, \mathbf{P}^f 和 \mathbf{R} 分别表示背景场和观测的误差协方差矩阵。在集合 Kalman 滤波数据同化中, \mathbf{P}^f 是由一组背景场的集合来提供的, 本文采用不扰动观测的 EnSRF (Ensemble Square-Root Filter, Evensen, 2004) 算法, 因此 \mathbf{R} 事先给定。参考世界气象组织观测规范, 将气压误差设为 ± 0.5 hPa, 温度场误差为 ± 0.1 K, 相对湿度误差为 $\pm 3\%$, 风速误差为 ± 0.5 m/s。

在目前非常规资料的利用还不能达到业务要求的情况下, 热带气旋数值预报还是建立在人造台风的基础之上。因此本文将人造台风作为观测场, 其模型为 Rankine (蓝金) 涡旋

$$v = A(z)F(r) \quad (3)$$

$$F(r) = \frac{v_m}{r_m} r \quad (r \leq r_m) \quad (4)$$

$$F(r) = \frac{v_m}{r_m} r^a \quad (r > r_m)$$

其中 r_m 为最大风速半径, v_m 为近中心最大风速。

为了生成背景场的集合, 本文从 MM5 模式积云参数化方案和边界层参数化方案中各选 3 个方案进行组合, 利用 NCEP $1^\circ \times 1^\circ$ 的 grib 再分析资料作为初始场, 水平格点数为 111×131 , 水平格距为 30 km (下文同) 进行短时预报, 为了增加初始成员的离散度, 对于相似的组合取不同的预报时间 (表 1)。将短时预报输出值作为初始集合成员, 这样就

表 1 模式参数配置与短时预报时间

Table 1 Model configurations and short-time forecast time

序号	积云参数化方案	边界层方案	短时预报时间 (min)
1	Anthes-kuo	High-resolution Blackadar	45
2	Anthes-kuo	Burk-Thompson	60
3	Anthes-kuo	MRF	75
4	Grell	High-resolution Blackadar	60
5	Grell	Burk-Thompson	75
6	Grell	MRF	45
7	Betts-Miller	High-resolution Blackadar	75
8	Betts-Miller	Burk-Thompson	45
9	Betts-Miller	MRF	60

得到了 9 个初始成员。

一个好的集合预报系统, 需要体现分析场的误差、模式的误差以及有足够多的集合成员。因此需要适当增加集合成员数。假设这 9 个初始场有较好的离散度, 那么通过初始场的均值就可以估计分析场的结构。初始场的集合成员均值向量可表示为

$$\mathbf{C} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \mathbf{A}_i \quad (5)$$

其中 \mathbf{A}_i 为集合成员向量, n 为集合成员数。

初始场间小尺度的差异往往是误差的来源, 该均值消除了这些小尺度的差异, 因此可将 \mathbf{C} 看作是集合预报的最优初始场 (Hamill, et al, 2000), 则误差向量

$$\hat{\mathbf{E}}_0 = \mathbf{C} - \mathbf{A} \quad (6)$$

9 个初始场就能够得到 9 个不同的误差估计 $\hat{\mathbf{E}}_0$, 因此从直观上讲, 一个新的集合预报初始场的产生, 可以通过在原始场均值的基础上加上误差向量, 通过改变误差向量的量级来得到不同的初始扰动场。

$$\mathbf{A}' = \mathbf{C} \pm \rho \hat{\mathbf{E}}_0 \quad (7)$$

从理论上讲, 就可以通过上式得到无限多的初始成员, 本文只考虑增加一倍, 因此问题的关键在于求得怎样的 ρ , 使得集合预报初始场的离散度最大。

由于假设 9 个初始成员有较好的离散度, 因此, 令集合成员增加前后的方差相等, 这样就得到最优的系数为

$$\rho = \sqrt{\frac{n+1}{n-1}} \quad (8)$$

式中 $n=9$, 则 $\rho=1.12$, 由于采用此方法使得每个初始场都对有一个扰动场, 因此将该方法称为“镜像法”, 这样就得到 18 个集合成员。

在观测场和背景场的集合都产生后, 就能够通过集合 Kalman 滤波数据同化方法得到集合预报的初值, 为了考虑模式的误差并增加离散度, 每个成员在预报过程中都选用与该成员短时预报不同的参数组合。控制预报选为非同化的传统人造台风植入方法, 参数组合选为 4, 这样就有 19 个集合成员。具体流程见图 1。

2.2 偏差修正方法

由模式带来的误差可以分为两类, 即系统误差和随机误差。集合预报的目标是通过集合平均减少随机误差, 而系统误差是由于参数间的不匹配造成

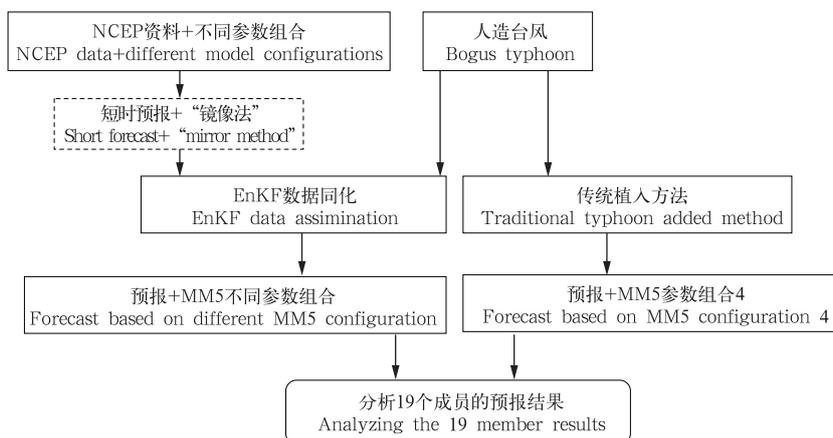


图 1 基于集合 Kalman 滤波数据同化的热带气旋集合预报流程

Fig. 1 The flow chart of tropical cyclone ensemble forecast based on Ensemble Kalman Filter (EnKF) data assimilation

的模式偏差,一般把系统性的误差称为模式平均偏差,本文将集合成员强度预报结果存在系统性的偏弱称为系统误差,这种误差是近似线性的和有规律的,不能通过集合平均得以消除,这为进行偏差修正提供了可能。Richardson(2001)曾指出,对中期集合预报结果进行偏差修正能够显著提高预报技巧,那么对短期预报而言,模式的误差是预报误差的主要来源,同时有研究表明(Frederick, 2003),样本均值的误差是概率预报误差的主要来源,因此对模式的偏差进行修正显然能够提高预报技巧。本研究中也发现,不对强度预报结果进行偏差修正,就很难提供有效的强度预报结果。当然进行偏差修正并非想通过复杂的方法使结果变为无偏。而是通过一种简单的方法来消除一些明显的偏差。对本文中统计变量中心气压 P_{centre} , 定义其某一时刻的偏差系数

$$b_i = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M \left(\frac{P_{\text{centre},m,t}}{P_{\text{obs},t}} \right) \quad (9)$$

其中 M 为训练样本数(非集合成员数), t 为时间指标, $P_{\text{obs},t}$ 为 t 时刻中心气压观测值, $P_{\text{centre},m,t}$ 为 t 时刻对应的第 m 个历史样本。如现在进行 48 h 强度预报结果的修正,那么 $t = 48$, 在历史数据库中进行了 M 次 48 h 强度预报试验,将每次第 48 小时预报的结果与其对应的观测值的比值,代表了预报与观测的偏差。将 M 个比值求平均,就得到由 M 个历史样本得到的数值模式对热带气旋强度第 48 小时预报的偏差系数。

那么经过偏差修正后的中心气压 $P_{\text{centre},t}^*$ 定义为

$$P_{\text{centre},t}^* = \frac{P_{\text{centre},t}}{b_i} \quad (10)$$

其中 $P_{\text{centre},t}$ 为 t 时刻中心气压预报值。一般来讲,需要足够多的训练样本才能保证偏差系数的合理性。文中每个时次,待修正的个例不参与偏差系数的计算,这样就有 15 个台风样本,而每个样本包括控制预报有 19 个成员,每个时次有 $15 \times 19 = 285$ 个样本参与偏差系数的计算,因此具有较好的可信度。

3 模拟预报试验

3.1 模拟个例

选择 2003—2004 年发生在西太平洋的 16 个热带气旋个例进行 72 h 模拟集合预报试验,包括了西行、转折、北上等路径,也包括了从 938 hPa 到 985 hPa 等不同初始强度的台风,因此具有一定的代表性(其基本信息如表 2)。为了进行对比分析,将部分个例作非同化的集合预报试验,集合方法为图 1 中去掉同化部分,将人造台风按传统方法加入背景场,个例如表 2 中星号所示。经统计,这 16 个个例中表示强度的两个量(中心最低气压和近中心最大风速)之间的相关系数大于 0.99,因此本文只讨论其中的中心最低气压来表示台风强度。

3.2 偏差修正前强度预报结果分析

未同化的 6 个台风强度集合预报各集合成员与中心气压观测值之差表明,除 0414 和 0419 号台风

表 2 热带气旋个例基本信息
Table 2 The information of tropical cyclone experiments

序号	台风名称(编号)	起报位置	起报时刻(UTC)	起报时刻 最大风速(m/s)	起报时刻 中心气压(hPa)	路径类型
1	KUJIRI(0302)	(10.6°N,146.3°E)	14 Apr 2003 06	51	944	西行
2	SOUDELOR(0306)	(18.1°N,123.4°E)	16 Jun 2003 12	31	980	转折
3	ETAU(0310)	(19.5°N,130.8°E)	05 Aug 2003 12	43	958	转折
4	DUJUAN(0313)	(18.4°N,132.2°E)	30 Aug 2003 18	41	963	西行
5	MAEMI(0314)	(21.8°N,130.3°E)	09 Sep 2003 00	46	954	转折
6	KETSANA(0317)	(19.0°N,132.4°E)	23 Oct 2003 06	54	938	东北行
7	NEPARTAK(0320)	(12.9°N,117.8°E)	15 Nov 2003 00	33	976	西北行
8	* NIDA(0402)	(11.1°N,127.2°E)	16 May 2004 00	45	955	转折
9	* CONSON(0404)	(17.9°N,119.1°E)	07 Jun 2004 18	25	985	东北行
10	DIANMU(0406)	(12.8°N,136.9°E)	15 Jun 2004 12	45	955	西北行
11	* RANANIM(0414)	(21.3°N,128.2°E)	10 Aug 2004 00	28	985	西北行
12	* SONGDA(0419)	(22.7°N,133.2°E)	03 Sep 2004 18	45	950	转折
13	* MEARI(0422)	(22.2°N,131.2°E)	25 Sep 2004 00	45	950	转折
14	TOKAGE(0424)	(19.2°N,132.0°E)	17 Oct 2004 00	50	940	转折
15	NOCK-TEN(0425)	(15.8°N,135.7°E)	22 Oct 2004 06	40	960	西北行
16	* NANMADOL(0428)	(9.4°N,139.0°E)	30 Nov 2004 06	28	980	西行

注:“*”表示该个例同时进行同化和非同化的集合预报试验。

外,集合预报中心气压大部分成员都大于观测,即预报的强度偏弱。对气压的统计采用完全平均法,将集合平均结果与控制预报比较,若集合平均结果比控制预报更接近观测,则认为该个例集合预报是成功的。集合平均和控制预报分别与观测之差显示,在第 6、12、18、24、30、36、42、48、54、60、66、72 小时预报时刻,成功的集合预报个例分别为 3、2、5、5、4、4、5、4、4、4、3、3 个,可见除第 12 小时外,其余预报时刻均有超过一半的个例集合预报结果要优于控制预报,因此在强度预报上,集合预报是要优于控制预报的。但预报的质量仍然有待改进,有些时次的强度预报误差较大。统计表明,采用集合 Kalman 滤波数据同化的方法,相对于未同化的集合预报对强度预报的改进不大。部分原因在于为了保持初始场的平衡,需要对台风强度进行平滑,减弱了中心强度;其次 MM5 中尺度模式在强度预报方面存在不足。而基于集合 Kalman 滤波数据同化的热带气旋集合预报在路径预报上超过了非同化集合预报的结果(黄小刚等,2007),因此需要通过偏差修正来改进强度预报,以提高基于集合 Kalman 滤波数据同化的热带气旋集合预报效果。

3.3 偏差修正后强度预报结果分析

经过偏差修正后,多数个例的强度预报结果都

要优于未进行偏差修正的结果。图 2 给出了其中的 0425 号台风的结果分析,其中计算相对技巧评分 RSS(Relative Skill Score,记为 S_{RS})值的公式如下

$$S_{RS} = \frac{E_{\text{Uncorrected}} - E_{\text{Bias-corrected}}}{E_{\text{Uncorrected}} + E_{\text{Bias-corrected}}} \times 100\% \quad (11)$$

正值表示强度预报得到改进,大小表示改进的程度。其中 E 为误差绝对值。

可以看出经过偏差修正后,强度预报水平得到了大幅提高,图 3 给出了每个统计时刻平均的强度预报 RSS 值,括号内为每个时次 RSS 值为正的个例数。平均而言通过偏差修正,在每个时次的强度预报误差都得到减小,从平均误差来看(图 4),各时次中心气压的预报误差都要比控制预报小。48、72 小时误差分别为 18 hPa 和 11 hPa。在第 48 小时提高了约 5 hPa,72 小时与 48 小时相当。

偏差修正对集合预报的更大贡献在于提高概率预报水平,而概率预报方法的选择对预报结果也有很大的影响。本文的概率预报计算方法采用 Hamill 等(1997)提出的 UR 法(uniform ranks, UR),该方法首先将样本按从小到大排列,以样本值为分点将概率分为 $n+1$ 等分。若阈值 τ 位于第 i 个等分区间内($1 < i \leq n$),那么参考值(V)大于阈值(τ)的概率为

$$P(V > \tau) = \frac{i}{n+1} + \left(\frac{x_i - \tau}{x_i - x_{i-1}} \right) \frac{1}{n+1} \quad (12)$$

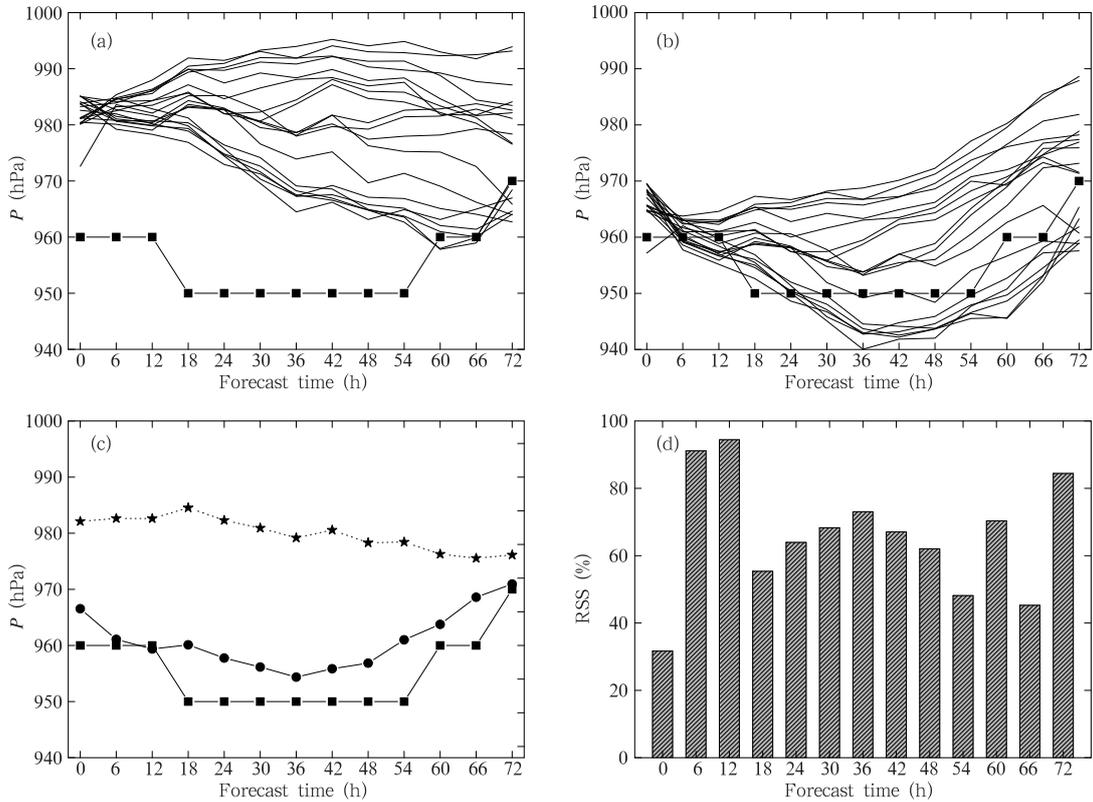


图2 0425号台风强度预报结果分析

(a. 偏差修正前中心气压随时间变化,方块标注为观测值,细线为各集成员预报值; b. 经偏差修正后中心气压随时间变化,图例同(a); c. 带五角星、圆点、方块分别为偏差修正前、后的集合平均值、观测值; d. RSS值)

Fig. 2 The analysis of typhoon (0313) intensity forecast

(The tropical cyclone center pressure change along forecast time before (a) and after (b) bias-corrected, the solid box means observations and the line with no mark means all the ensemble forecast results; (c) the ensemble mean before (filled pentacle) and after (filled circle) bias-corrected, and the observations (filled box); and (d) the RSS scores for the intensity forecast)

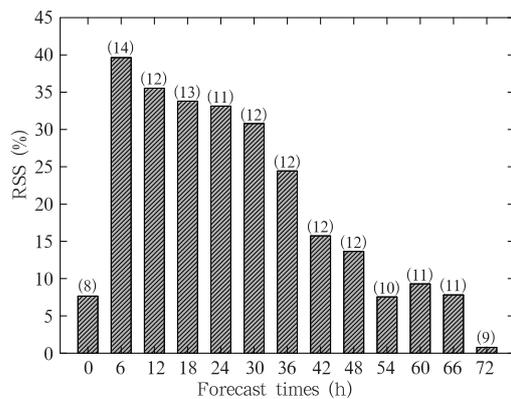


图3 强度预报 RSS 平均得分

(括号为各时次 RSS 得分为正的个例数)

Fig. 3 The mean RSS scores for the intensity forecast

(The number in bracket means the sum in all ensemble cases when $S_{RS} > 0$)

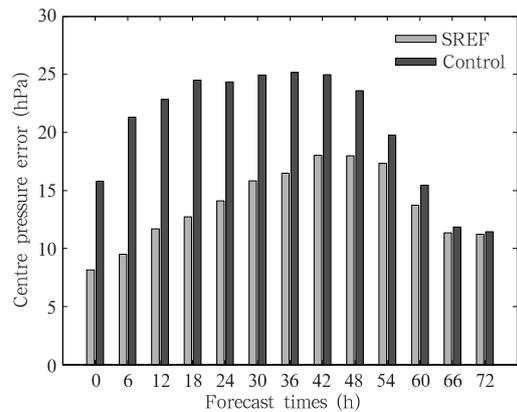


图4 集合预报与控制预报强度

预报误差对比分析

Fig. 4 The comparative analysis of intensity forecast error between ensemble and control forecast

UR 方法的优势还体现在对一些极端情况的处理,如 τ 位于第 1 区间或第 $n+1$ 区间时,采用极端事件概率计算的第一型 Gumbel 累计概率密度函数。

图 5 给出了从第 48 小时各台风个例集合成员中心气压预报值得到的预报概率密度函数曲线,其中虚线为修正前,实线为修正后。可见偏差修正改变了概率密度函数的均值。概率密度函数均值对概率预报的影响更为显著,从最简单的概率预报计算方法来看,将超过阈值的概率密度函数曲线覆盖的面积作为概率预报值,若将台风中心气压观测值(图

中横坐标“Obs”表示)作为预报概率密度函数均值的理论值,那么修正后的概率密度函数均值向观测靠近,就能提高概率预报的技巧。

第 48 小时预报时刻,将阈值设为观测加 3 hPa,求小于此阈值的概率。从表 3 可见,偏差修正对概率预报的改进是非常明显的,0310、0320、0402、0404、0414、0422、0428 等台风强度的概率预报得到了质的改变,而 0317、0424、0425 等个例也有不同程度的提高,这提高了用户正确使用集合预报产品的可能,同时采用 UR 方法计算的概率没有了 100%

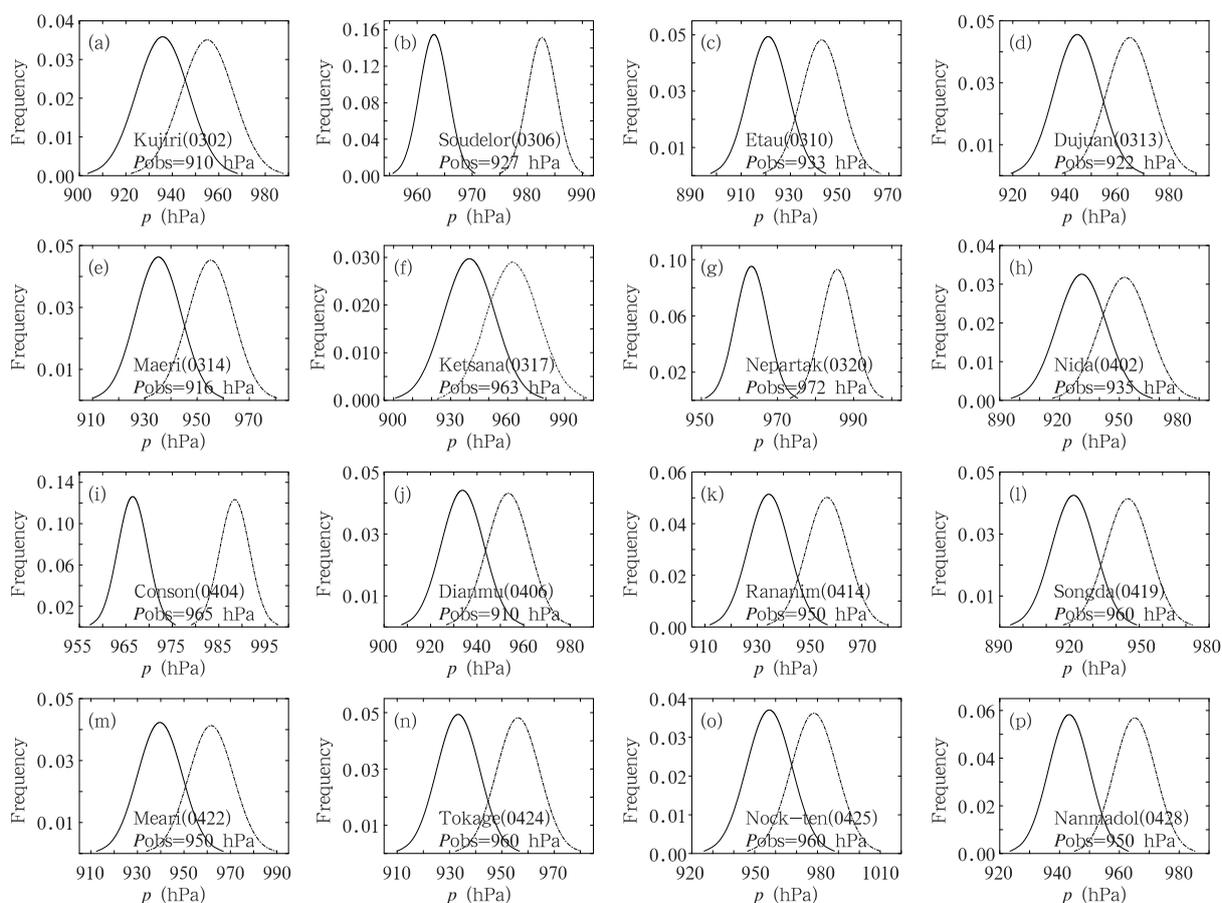


图 5 第 48 小时各台风个例强度预报概率密度函数曲线(虚线为修正前,实线为修正后)

Fig. 5 The intensity forecast probability density function curve at the 48-hour before (dashed line) and after (solid line) bias-corrected for all typhoon samples

表 3 第 48 小时强度概率预报(%)

Table 3 The probability forecast of tropical cyclone intensity at the 48th hours (%)

	0302	0306	0310	0313	0314	0317	0320	0402
UR Bias-corrected	5.1538	5.2322	88.627	4.9265	4.555	89.488	95.948	68.813
UR Uncorrected	5.1534	5.2322	22.800	4.9125	4.4672	69.731	5.2324	17.255
	0404	0406	0414	0419	0422	0424	0425	0428
UR Bias-corrected	60.859	5.1028	96.686	94.843	99.351	95.007	40.583	90.056
UR Uncorrected	5.1442	5.0958	33.82	97.552	20.539	75.401	4.5833	7.3332

或0%的极端情况,这更加符合概率预报的原则。从偏差修正后的概率预报结果来看,UR方法有10个台风个例满足条件的概率超过了50%,而未进行偏差修正得到的概率预报只有3个台风个例满足条件的概率超过50%,因此认为通过偏差修正后的强度预报是成功的。

图6给出了偏差修正前后各台风个例预报中间时段的标准差分布,可见偏差修正后标准差都有不同程度的降低,这是由于在偏差修正前,各集合成员预报值与观测存在不同的偏差,而偏差修正将各成员都向观测调整,使得成员间的偏差降低,从而降低了方差,因此概率预报的值也相应增大。

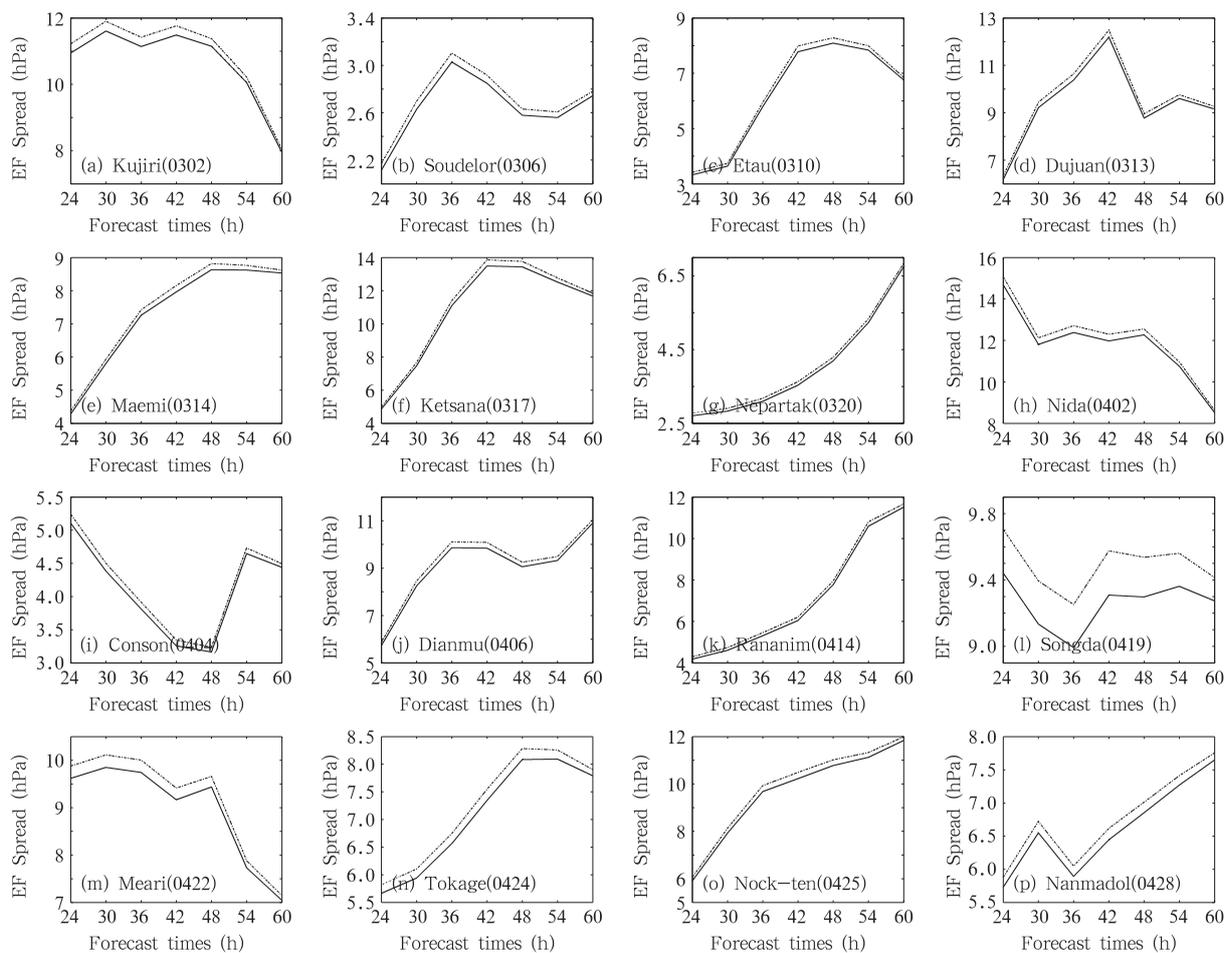


图6 强度集合预报中间时段标准差(虚线为修正前,实线为修正后)

Fig. 6 The intensity ensemble forecast spread from 24 to 60 hours before (dashed line) and after (solid line) bias-corrected for all typhoon samples

4 结论与讨论

在短期集合预报系统中,模式的误差起着重要的作用。模式误差分为系统性误差和随机性误差。随机误差是预报不确定性的主要来源,需要通过扰动模式加以考虑。而系统性的误差则是模式偏差,它不是预报不确定性的来源,但却带来较大的预报误差。因此本文通过简单的偏差修正方法来消除系

统误差,挖掘了集合预报在热带气旋强度预报方面的潜力。结果表明,通过偏差修正减小了强度集合预报均值的误差,进而使得预报概率密度函数均值向理论值靠近,从而提高了概率预报的精度,因此基于集合预报的偏差修正分析方法,是改善热带气旋强度预报水平的有效途径。

然而本文只是采用了简单的偏差修正方法,修正系数的计算存在样本数不足的情况。因此需要通

过更多的训练样本,对不同的初始强度和路径特征的台风类型分别得到不同的修正系数。本文的偏差系数只是随时间不同,在同一时刻每个成员都采用同样的偏差系数,这是由于本文样本数少的缘故,通过增加样本数,对每个集合成员采用不同的偏差系数,可能会提高集合成员的离散度,减少成员间的相关性,并得到更高质量的概率预报结果。

参考文献

- 端义宏,余晖. 2005. 热带气旋强度变化研究进展. 气象学报, 63(5):636-645
- 黄小刚,费建芳,陆汉城. 2007. 基于集合 Kalman 滤波数据同化的热带气旋路径集合预报研究. 大气科学, 31(3):468-478
- 马旭林,薛纪善,陆维松. 2008. GRAPES 全球集合预报的集合卡尔曼变换初始扰动方案初步研究. 气象学报, 66(4):526-536
- 周霞琼,端义宏,朱永祺. 2003. 热带气旋路径集合预报方法研究 I: 正压模式结果的初步分析. 热带气象学报, 19(1): 1-7
- Cheung K W, Chan C L. 1999. Ensemble forecasting tropical cyclone motion using a barotropic model. Part II: Perturbations of the vortex. *Mon Wea Rev*, 127: 2617-2640
- Cheung K W. 2001. Ensemble forecasting of tropical cyclone motion: Comparison between regional bred modes and random perturbations. *Meteor Atmos Phys*, 78: 23-34
- DeMaria M, Kaplan J. 1994. A statistical hurricane intensity prediction scheme (SHIPS) for the Atlantic basins. *Wea Forecasting*, 9: 209-220
- DeMaria M, Kaplan J. 1999. An updated statistical hurricane intensity prediction scheme (SHIPS) for the Atlantic and eastern North Pacific basins. *Wea Forecasting*, 14: 326-337
- Emanuel K A, DesAutels C, Holloway C, et al. 2004. Environmental control of tropical cyclone intensity. *J Atmos Sci*, 61: 843-858
- Elsberry R L, Carr L E. 2000. Consensus of dynamical tropical cyclone track forecasts-error versus spread. *Mon Wea Rev*, 128: 4131-4138
- Evensen G. 1994. Sequential data assimilation with a nonlinear quasi-geostrophic model using Monte Carlo methods to forecast error statistics. *J Geophys Res*, 99(C5): 10143-10162
- Evensen G. 2004. Sampling strategies and square root analysis schemes for EnKF. *Ocean Dyn*, 54: 539-560
- Fraedrich K, Leslie L M. 1987. Combining predictive schemes in short-term forecasting. *Mon Wea Rev*, 115: 1640-1644
- Frederick A E. 2003. Effective mesoscale, short-range ensemble forecasting [D]. University of Washington
- Goerss J. 2000. Tropical cyclone track forecasts using an ensemble of dynamical models. *Mon Wea Rev*, 128: 1187-1193
- Hamill T M, Colucci S J. 1997. Verification of Eta-RSM short-range ensemble forecasts. *Mon Wea Rev*, 125: 1312-1327
- Hamill T M, Mullen S L, Snyder C, et al. 2000. Ensemble forecasting in the short to medium range: report from a workshop. *Bull Amer Meteor Soc*, 81: 2653-2664
- Leslie L M, Fraedrich K. 1990. Reduction of tropical cyclone position errors using an optimal combination of independent forecasts. *Wea Forecasting*, 5: 158-161
- Molteni F, Buizza R, Palmer T N, et al. 1996. The ECMWF ensemble prediction system: Methodology and validation. *Quart J Roy Meteor Soc*, 122: 73-119
- Richardson D S. 2001. Ensembles using multiple models and analyses. *Quart J Roy Meteor Soc*, 127: 1847-1864
- Toth Z, Kalnay E. 1993. Ensemble forecasting at NMC: The generation of perturbations. *Bull Amer Meteor Soc*, 74: 2317-2330
- Tracton M S, Kalnay E. 1993. Operational ensemble prediction at the National Meteorological Center: Practical aspects. *Wea Forecasting*, 8: 379-398
- Zhang Z, Krishnamurti T N. 1999. A perturbation method for hurricane ensemble predictions. *Mon Wea Rev*, 127: 447-469