

基于集合 Kalman 滤波数据同化的 热带气旋路径集合预报研究

黄小刚 费建芳 陆汉城

解放军理工大学气象学院军事气象系, 南京 211101

摘 要 构建了一个基于集合 Kalman 滤波数据同化的热带气旋集合预报系统, 通过积云参数化方案和边界层参数化方案的 9 个不同组合, 采用 MM5 模式进行了不同时间的短时预报。对预报结果使用“镜像法”得到 18 个初始成员, 为同化提供初始背景集合。将人造台风作为观测场, 同化后的结果作为集合预报的初值, 通过不同参数组合的 MM5 模式进行集合预报。对 2003~2004 年 16 个台风个例的分析表明, 初始成员产生方法能够对热带气旋的要素场、中心强度和位置进行合理扰动。同化结果使台风强度得到加强, 结构更接近实际。基于同化的集合路径预报结果要优于未同化的集合预报。使用“镜像法”增加集合成员提高了预报准确度, 路径预报误差在 48 小时和 72 小时分别低于 200 km 和 250 km。

关键词 热带气旋 集合预报 集合 kalman 滤波数据同化 路径预报

文章编号 1006-9895(2007)03-0468-11

中图分类号 P444

文献标识码 A

The Ensemble Forecasting of Tropical Cyclone Track Based on Ensemble Kalman Filter Data Assimilation

HUANG Xiao-Gang, FEI Jian-Fang, and LU Han-Cheng

Institute of Meteorological College, PLA University of Science and Technology, Nanjing 211101

Abstract The technique of ensemble forecasting based on Ensemble Kalman Filter (EnKF) data assimilation is applied to the problem of tropical cyclone track prediction using MM5 model. Adopting the Anthes-kuo, Grell and Betts-Miller cumulus parameterization schemes, High-resolution Blackadar, Burk-Thompson and MRF PBL process parameterization schemes to design 9 groups model configuration, 45-, 60- and 75-minute forecasts are conducted for each situation. With the “mirror imaging method”, 18 different initial conditions are obtained. Taking the “Rankine vortex” as observation 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 with 9 different model configuration, 72-hour forecast is simulated.

Two experiments are designed. One is non-assimilation ensemble forecasting, in which bogus typhoon is directly joined and 6 typhoon cases in 2004 are selected. The other is the ensemble forecasting based on EnKF data assimilation, in which 16 typhoon cases in 2003 and 2004 are selected. There are three methods, full ensemble average, cluster average and select average, in ensemble average.

The results show that because of no adjoint processing, EnKF data assimilation method is more efficient than that of 4D-VAR, and with the assimilation, the intensity of typhoon becomes stronger and its central position is corrected. By disturbing the background fields, the disturbances of the initial position, intensity and structure of ty-

phoon occur.

The results of the first experiment show that the error of the typhoon position with data assimilation is less than non-assimilation, especially is the cases of number 0419 typhoon. The results of the second experiment show that the position error of clustering average method is the smallest among the three methods. On the average, the error for 24-hour prediction is within 130 km, the errors for 48-hour and 72-hour predictions are less than 200 km and 250 km respectively. In every forecast time, there are at least more than half cases whose errors are less than that of control prediction. The results indicate that the accuracy of the forecast position is much more improved by using ensemble forecast method based on EnKF than that of control forecast in the cases of recurved track type and the cases with weaker intensity.

One application of ensemble forecasting is to estimate the probability distribution of weather phenomenon. As for tropical cyclone, the most important thing the authors concern is that what the observational typhoon track is within the range of the forecast tracks. Since the moving route of tropical cyclone is a two-dimensional problem with direction and speed, any analysis of its ensemble forecasting results should include two aspects. The results of the statistical analysis of 16 typhoon cases show that for every forecast time, more than 65% cases include moving direction and all cases at the 54th hour. For moving speed, it is more than 50% cases that include observational values at every forecast time and more than 90% cases at middle prediction time. The prediction of directions and speeds is successful on the whole.

The experiments show that ensemble forecast method can improve the forecast veracity of the tropical cyclone track, and the method suggests in this paper based on EnKF data assimilation is an effective approach.

Key words tropical cyclone, ensemble forecast, ensemble Kalman Filter data assimilation, track prediction

1 引言

初始资料误差、模式误差以及大气系统本身的混沌特性使数值预报存在不确定性。数值预报问题由确定性预报转变成概率预报,其基础是基于随机动力学的估计理论,集合预报和数据同化是估计理论在气象中的具体应用。

集合预报首先由 Epstein^[1]和 Leith^[2]从大气运动的随机性角度提出,经历了 20 世纪 70~80 年代的研究探索和数值试验后,已经有多种产生初值扰动的方法,目前较为成功的是增长模繁殖法^[3,4]和特征向量法^[5],主要应用于中纬度地区的中期天气预报。而低纬以及热带地区的天气系统,特别是热带气旋等,在动力和热力机制上与中纬地区天气系统有很大的差别,因此,需要针对热带气旋等低纬天气系统的短期预报特点,进行专门的集合预报技术研究。目前针对热带气旋的集合预报方法可分为两类^[6~10],一是扰动台风环境场,二是扰动台风涡旋结构。然而,在热带气旋短期集合预报中,模式误差对预报误差起着重要的贡献,同时热带气旋的初始位置、强度和结构也有重要的影响,因此,本文的目的是在集合预报系统中包含以上的信息。

为了提高模式的预报质量,需要使用现实的观测对模式的误差进行修正,这也是数据同化的实

质:它由气象变量观测值的时间序列,借助力模式决定最佳的初始值^[11]。同化的任务是估计一个事件的概率分布,概率分布则通过集合样本来描述,只有将集合与同化结合起来,才能真正体现估计理论的价值,因此,集合预报和资料同化成了一个问题两个方面。

我们通常所说的基于最优的同化其实都是非集合同化,主要代表是 Kalman 滤波。单纯的 Kalman 滤波可以通过线性动力系统来估计误差协方差矩阵,但对于高度非线性的数值预报模式则不可行。Evensen^[12]提出的集合 Kalman 滤波方法(EnKF)首先采用扰动观测法得到一组分析场,将这组分析场作为初值进行短时预报,将短时预报结果作为背景集合与扰动后的观测场一起进行 EnKF 数据同化。该方法减小了观测带来的误差,同时由于短时预报结果反映了初始场的误差,因此为集合预报提供了一组较为合理的初值。本文采用 MM5V3 模式,构造了基于集合 Kalman 滤波数据同化的热带气旋集合预报系统,并对 2003~2004 年度 16 个台风个例进行模拟预报试验。

2 集合预报系统设计

2.1 集合 Kalman 滤波原理

集合 Kalman 滤波的分析方程^[12]可以写为

$$\bar{\mathbf{x}}_t^a = \bar{\mathbf{x}}_t^f + \mathbf{K}_{te}(\mathbf{y}_t^o - \mathbf{H}\bar{\mathbf{x}}_t^f), \quad (1)$$

其中, $\bar{\mathbf{x}}_t^f$ 为初猜场均值, $\bar{\mathbf{x}}_t^a$ 为分析场均值, \mathbf{y}_t^o 是观测向量, \mathbf{K}_{te} 被称为 Kalman 增益矩阵, 下标 t 表示时刻, e 表示集合。增益矩阵写为

$$\mathbf{K}_{te} = \mathbf{B}_{te}\mathbf{H}^T(\mathbf{H}\mathbf{B}_{te}\mathbf{H}^T + \mathbf{R}_t)^{-1}, \quad (2)$$

其中, \mathbf{B}_{te} 和 \mathbf{R}_t 分别表示背景场和观测的误差协方差矩阵, \mathbf{H} 为观测算子。

集合 Kalman 滤波把误差统计量的预报隐含在一组加上扰动的模式变量的集合预报中, 然后把这组预报值的差异作为误差统计的样本来进行预报场误差协方差的估计, 而无需专门对误差协方差进行预报。同样, 很容易将分析值的差异作为分析误差的统计样本来进行分析误差协方差的估计。这样, 使得 Kalman 滤波对模式变量的误差统计量的估计和发展在实际应用中得以实现。同时, 集合思想的引入, 解决了 Kalman 滤波应用在非线性系统中的近似问题。它把误差统计的预报隐含在一组加上不同扰动的模式变量的集合预报中后, 误差统计的发展和模式变量一起, 随着非线性模式发展, 从而避免了切线性近似, 同时利用随机样本的预报值估计协方差, 准确度会较高。集合 Kalman 方法成为目前发展最快的集合成员生成方法^[13]。

由上可见, 建立集合 Kalman 滤波数据同化系统, 首先需要设计产生随机取样背景集合的成员产生方法, 其次需要获取热带气旋的观测, 最后要设计该同化方法的实现算法。

2.2 背景集合成员产生方法

背景集合成员间的差异需要能够反映初值的误差分布, 同时要反映模式的误差。研究表明^[14~16],

使用 MM5V3 模式研究台风时, 采用不同的边界层方案引起的台风边界层感热、潜热和动量的垂直输送对台风的发生、发展起着十分重要的作用, 而不同的积云参数化方案对云物理特征和垂直运动特征的模拟都存在一定的差异。Stensrud 等^[17]发现在前 12 小时, 物理集合对预报误差的贡献是初值集合的 2~6 倍, 且对地表气象变量而言, 物理集合方案比初值集合方案的影响要大得多。为了生成不同的初始场, 本文从 MM5V3 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 (下同) 进行短时预报, 为了增加初始成员离散度, 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, 这样就得到了 9 个初始成员。

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。初始场的均值可表示为

$$\mathbf{C} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \mathbf{A}_i, \quad (3)$$

其中, \mathbf{A}_i 为集合成员向量, \mathbf{C} 为集合成员均值向量, 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, 误差向量 \mathbf{E}_0 则可用下式估计:

$$\hat{\mathbf{E}}_0 = \mathbf{C} - \mathbf{A}. \quad (4)$$

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,

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 Member number | 积云参数化方案 Cumulus parameterization scheme | 边界层方案 PBL scheme | 短时预报时间 Short-time forecast time/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 |

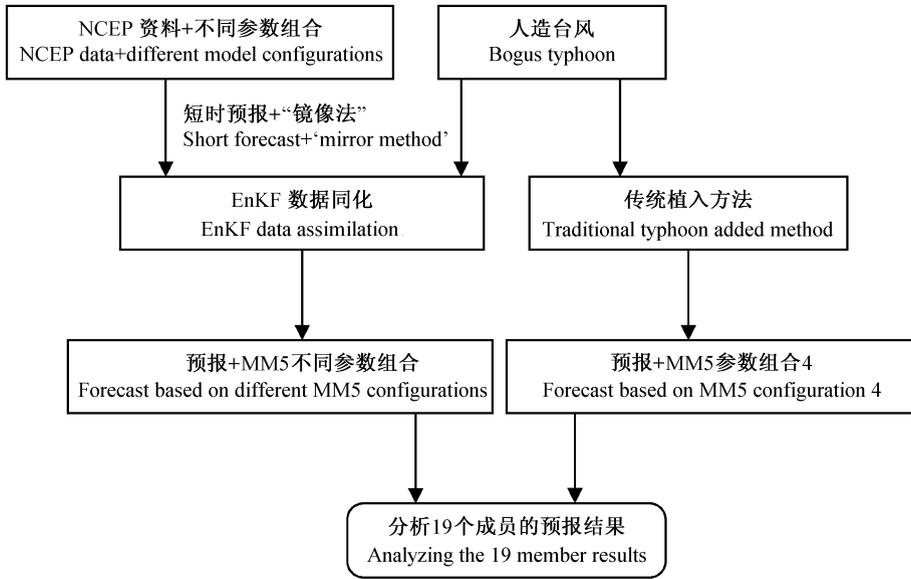


图1 基于集合 Kalman 滤波数据同化的热带气旋集合预报流程图

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

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,

$$A' = C \pm \rho \hat{E}_0. \quad (5)$$

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差最大。

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

$$\rho = \sqrt{\frac{n+1}{n-1}}. \quad (6)$$

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

2.3 热带气旋观测资料处理

人造台风是目前热带气旋数值模拟和预报中常用的方法^[19]。因此, 本文将人造台风作为观测场, 其模型为 Rankine (蓝金) 涡旋:

$$v = A(z)F(r), \quad (7)$$

$$F(r) = \begin{cases} \frac{v_m r}{r_m}, & r \leq r_m, \\ \frac{v_m r^\alpha}{r_m}, & r > r_m, \end{cases} \quad (8)$$

其中, r_m 为最大风速半径, v_m 为近中心最大风速, $A(z)$ 为风垂直分布系数, α 为外围风速变化系数。

构造台风所需初始资料可由文献[20]查询。由于人造台风变量与模式变量相同, 且将格点分布与模式取为一致, 这样可以省去观测算子 H 的计算, 从而利于集合 Kalman 滤波数据同化的计算。

2.4 EnKF 数据同化实现算法

热带气旋中心位置在投影平面上坐标的确定可参阅文献[21], 同化半径的选定则从原始分析场出发, 采用 Kurihara 等^[22]提出的滤波方法, 将分析台风半径作为同化半径。本文不考虑观测扰动, 采用集合均方根算法 EnSRF (Ensemble Square-Root Filter)^[23]。由于同化区域只是预报区域的一部分, 因此采用逐点局地分析方法, 将截断半径设为 100 km。该算法对观测场不进行扰动, 因此需要事先设定观测场误差协方差矩阵, 且该矩阵为正定、对角矩阵。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。

采用初始集合成员计算背景误差协方差, 经过 EnKF 数据同化得到一组预报的初值, 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生成该成员所进行的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。综上所述, 本文设计的集合预报流程如图 1 所示。

表 2 热带气旋个例基本信息

Table 2 The information of tropical cyclone experiments

| 序号 No. | 台风名称 (编号) Name of TC (Serial number) | 初始位置 Initial position | 起始时刻 Model initial time (UTC) | 初始时刻最大风速 Initial maximum wind/m · s ⁻¹ | 初始时刻中心气压 Initial pressure of the centre | 路径类型 Track type |
|-----------|--------------------------------------------|--------------------------|-------------------------------------|---------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|--------------------|
| 1 | KUJIRI (0302) | (10.6°N, 146.3°E) | 0600 14 Apr 2003 | 51 | 944 hPa | 西行 Westward |
| 2 | SOUDELOR (0306) | (18.1°N, 123.4°E) | 1200 16 Jun 2003 | 31 | 980 hPa | 转折 Recurved |
| 3 | ETAU (0310) | (19.5°N, 130.8°E) | 1200 05 Aug 2003 | 43 | 958 hPa | 转折 Recurved |
| 4 | DUJUAN (0313) | (18.4°N, 132.2°E) | 1800 30 Aug 2003 | 41 | 963 hPa | 西行 Westward |
| 5 | MAEMI (0314) | (21.8°N, 130.3°E) | 0000 09 Sep 2003 | 46 | 954 hPa | 转折 Recurved |
| 6 | KETSANA (0317) | (19.0°N, 132.4°E) | 0600 23 Oct 2003 | 54 | 938 hPa | 东北行 Northeastward |
| 7 | NEPARTAK (0320) | (12.9°N, 117.8°E) | 0000 15 Nov 2003 | 33 | 976 hPa | 西北行 Northwestward |
| 8 | * NIDA (0402) | (11.1°N, 127.2°E) | 0000 16 May 2004 | 45 | 955 hPa | 转折 Recurved |
| 9 | * CONSON (0404) | (17.9°N, 119.1°E) | 1800 7 Jun 2004 | 25 | 985 hPa | 东北行 Northeastward |
| 10 | DIANMU (0406) | (12.8°N, 136.9°E) | 1200 15 Jun 2004 | 45 | 955 hPa | 西北行 Northwestward |
| 11 | * RANANIM (0414) | (1.3°N, 128.2°E) | 0000 10 Aug 2004 | 28 | 985 hPa | 西北行 Northwestward |
| 12 | * SONGDA (0419) | (2.7°N, 133.2°E) | 1800 3 Sep 2004 | 45 | 950 hPa | 转折 Recurved |
| 13 | * MEARI (0422) | (22.2°N, 131.2°E) | 0000 25 Sep 2004 | 45 | 950 hPa | 转折 Recurved |
| 14 | TOKAGE (0424) | (19.2°N, 132.0°E) | 0000 17 Oct 2004 | 50 | 940 hPa | 转折 Recurved |
| 15 | NOCK-TEN (0425) | (15.8°N, 135.7°E) | 0600 22 Oct 2004 | 40 | 960 hPa | 西北行 Northwestward |
| 16 | * NANMADOL (0428) | (9.4°N, 139.0°E) | 0600 30 Nov 2004 | 28 | 980 hPa | 西行 Westward |

注：“*”表示该热带气旋个例同时进行同化与非同化的集合预报试验。

Note: “*” means that the ensemble forecast experiment for this tropical cyclone is based on both assimilation and no assimilation.

3 模拟预报试验

选择 2003~2004 年发生在西太平洋的 16 个热带气旋个例进行 72 小时模拟集合预报试验, 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 (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。

3.1 EnKF 数据同化结果分析

为了考查 EnKF 同化方法在效率上的提高情况, 在 P4 2.4G 计算机上对 EnKF 同化与四维变分同化 (4D-VAR) 方法进行比较测试, 采用同样的 MM5V3 模式, 4D-VAR 水平方向取 91×91 个格点, 垂直方向同为 23 层, 同化窗口为 15 min, 迭代步数为 30 步, 时间步长取为 90 s。

EnKF 同化方法由于无需伴随, 即使加上产生集合成员需要的约半小时, 在时间上仍比四维变分方法有非常明显的提高。EnKF 受同化半径的影

表 3 EnKF 与 4D-VAR 同化耗费时间对比

Table 3 The comparison of expended time between EnKF and 4D-VAR

| 台风编号 Typhoon serial number | EnKF | | 4D-VAR |
|-------------------------------|-----------------------------|---------------------------|---------|
| | 同化半径 Assimilation radius | 同化时间 Assimilation time | |
| 0302 | 790 km | 1050 s | 13143 s |
| 0317 | 980 km | 1524 s | 11815 s |
| 0320 | 510 km | 543 s | 10068 s |

响, 半径越大, 同化时间越多 (试验结果见表 3)。

图 2 为通过 KUJIRI (0302) 台风中心的纬向垂直剖面, 其中实线为经向风分量, 阴影部分为风速大于 30 m/s 区域, 虚线为位温。通过对比能够看出, 同化后台风强度得到加强, 虽然人造台风为对称分布, 但由于考虑了背景场的因素, 使得同化后的台风风场呈现非对称分布。从位温分布来看, 在中上层出现了明显的暖中心。由于集合成员较好的考虑了初始场误差, 同时包含了模式的误差, 因此没有出现滤波发散的问题。

3.2 初始扰动分析

目前, 不管采用飞机、雷达和卫星对台风中心

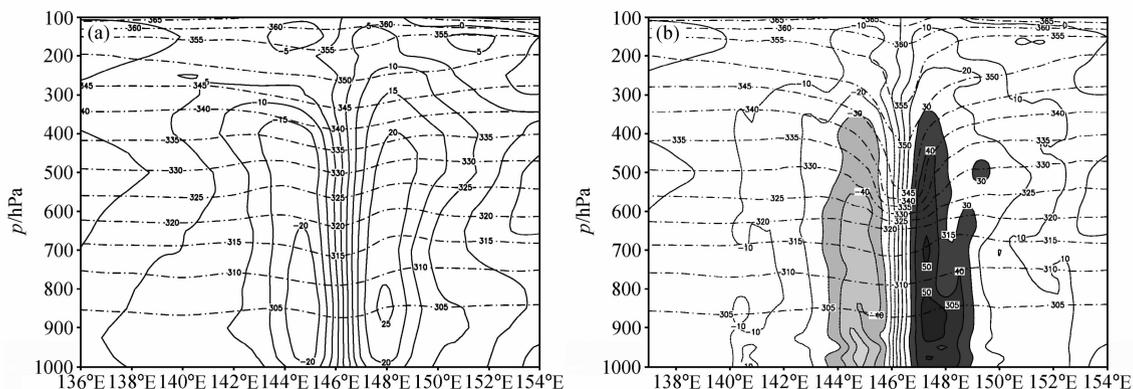


图 2 0302 号台风过台风中心的经度-高度剖面图: (a) 同化前; (b) 同化后。实线为经向风, 阴影部分为绝对值 >30 m/s; 虚线为位温
Fig. 2 Longitude-height cross sections passing the typhoon (0302) centre before (a) and after (b) assimilation. The regions with meridional wind (solid line) larger than 30 m/s or less than -30 m/s are shaded. The dashed contour is potential temperature

进行定位都会存在一定的误差^[6], 因此, 热带气旋集合预报初始扰动需要考虑初始位置的扰动。从 16 个台风个例初始位置扰动的统计情况来看, 平均扰动达到 24.3 km, 最大扰动为 39.2 km, 最小扰动为 9.5 km, 在象限分布上主要以第二象限为主, 这主要因为本文方法是建立在初始短期预报基础上的, 初始位置的扰动趋势是向移动方向偏移, 因此在有限成员的基础上很难布满整个象限。然而, Zhang 和 Krishnamurti^[6, 7] 指出, 初始位置扰动对方向没有优先级, 也就是说不存在某个最佳扰动的方向。因此, 本文对初始位置的扰动可以看作是可行的。

从 16 个台风初始扰动场中心气压与观测中心气压之差来看, 其值最大达到了 13 hPa (0402), 最小也有 4 hPa (0404), 说明具有一定的离散度。同时台风各集合成员海平面气压与控制预报的差值场 (图 3) 的差异显示了初始要素场的扰动。而正是通过要素场的扰动, 同时完成了热带气旋初始位置和强度的扰动, 因此是适合于热带气旋之特定预报对象的。

3.3 结果分析

3.3.1 路径预报分析方法

热带气旋路径集合预报将得到一组不同路径预报值, 选取合适的分析方法, 从而尽可能地提取集合预报结果中的有用信息是非常重要的, 不好的分析方法将会降低集合预报的预报技巧。针对本文的设计方案, 选用三种不同的分析方法。最基本的方法是完全平均法, 即将预报结果等权重的求平均, 计算方便。然而, 它比较依赖于集合成员的数量,

而且会使结果过于平滑, 这样可能会失去一些有用的信息。第二种方法叫聚类平均法, 首先对预报结果进行聚类分析, 将成员分为 5 类, 按成员数最多的前三个聚类各自进行完全平均看作是最有可能的预报结果。第三种方法叫选择平均法, 本文将第 12 小时的预报结果与观测比较, 将误差按从小到大排序在前十位的成员进行完全平均, 从而减少误差较大的成员对集合预报结果的影响。

3.3.2 同化与非同化的对比分析

对选择的 6 个台风个例预报结果的总体平均进行比较。从不同分析方法结果 (表 4) 对比来看, 同化后的路径预报结果都要优于非同化之结果, 对同化后的路径预报结果来看, 在前 24 小时, 选择平均方法效果最好, 在后 48 小时, 聚类平均结果最优。这说明采用 EnKF 数据同化方法得到的初始场同时考虑了背景场和观测的误差, 因此对热带气旋结构的描述要优于传统的人造台风方法。而台风路径预报结果与分析方法有直接的关系。同时, 两种集合路径预报结果都要优于控制预报, 说明本文的集合预报方法, 对路径预报结果有较好的提高。

3.3.3 路径预报结果分析

根据 16 个热带气旋个例 (见表 2) 预报结果的总体平均 (表 5) 来看, 24 小时误差小于 130 km, 48 小时误差在 200 km 以下, 72 小时误差也均在 250 km 以内。相对于目前的业务预报水平有了较大的提高^[24], 相对于控制预报来讲, 前 48 小时, 聚类分析方法提供了较好的预报, 48 小时以后各种分析方法都比控制预报有较大的提高。而控制预报相对于目前业务预报平均水平也有较大的改进,

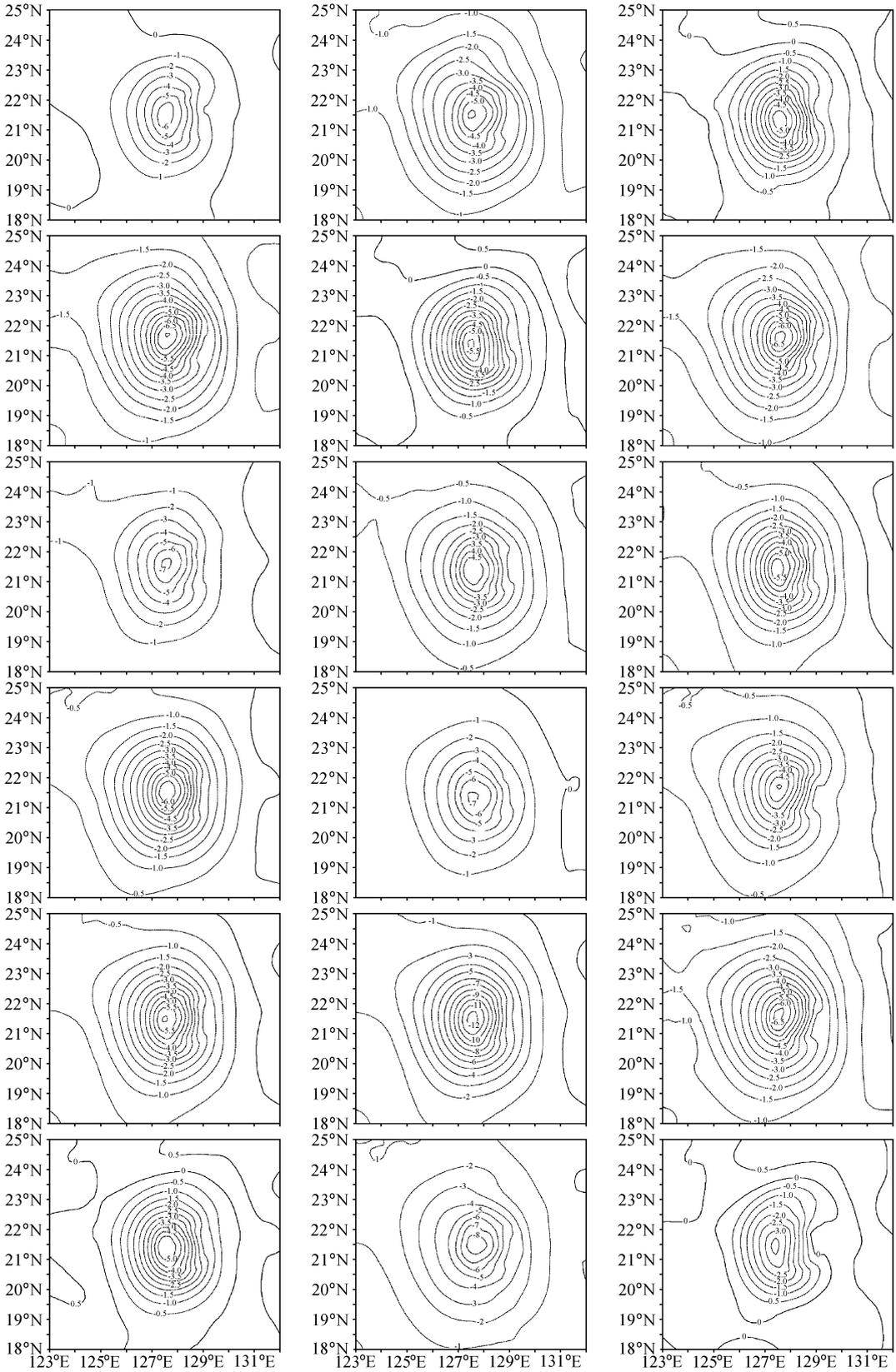


图3 0414号台风各集合成员与控制预报海平面气压之差值场

Fig. 3 The difference fields of the sea level pressure by each ensemble members minus control forecasting for typhoon (0414)

表 4 同化与非同化路径预报平均误差之不同分析方法比较 (单位: km)

Table 4 The comparison of mean track errors (km) with different analysis methods between EnKF and no EnKF

| 预报时间 Forecast time | 完全平均 Full Ens (Full Ensemble mean) | | 聚类平均 Cluster (Custer mean) | | 选择平均 Select (Select mean) | | 控制预报 Control (Control run) |
|-----------------------|---------------------------------------|------|-------------------------------|------|------------------------------|------|----------------------------------|
| | No EnKF | EnKF | No EnKF | EnKF | No EnKF | EnKF | |
| 12 h | 84 | 64 | 79 | 68 | 68 | 53 | 69 |
| 24 h | 158 | 123 | 130 | 120 | 147 | 115 | 149 |
| 36 h | 240 | 180 | 184 | 160 | 229 | 171 | 206 |
| 48 h | 305 | 200 | 238 | 159 | 276 | 200 | 306 |
| 60 h | 394 | 224 | 295 | 187 | 344 | 231 | 422 |
| 72 h | 429 | 274 | 375 | 240 | 401 | 251 | 451 |

表 5 热带气旋集合预报路径平均误差统计 (单位: km)

Table 5 The mean track errors (km) for the tropical cyclone ensemble forecast based on different analysis methods

| 分析方法 Analysis method | 时间 Time | | | | | |
|-------------------------|---------|------|------|------|------|------|
| | 12 h | 24 h | 36 h | 48 h | 60 h | 72 h |
| Full Ens | 70 | 115 | 150 | 186 | 223 | 239 |
| Cluster | 74 | 105 | 110 | 129 | 160 | 218 |
| Select | 72 | 124 | 156 | 196 | 240 | 249 |
| Control | 58 | 106 | 147 | 212 | 290 | 318 |

表 6 转折路径平均误差统计 (单位: km)

Table 6 The mean errors (km) of ensemble forecast for a tropical cyclone with recurved track type based on different analysis methods

| 分析方法 Analysis method | 时间 Time | | | | | |
|-------------------------|---------|------|------|------|------|------|
| | 12 h | 24 h | 36 h | 48 h | 60 h | 72 h |
| Full Ens | 65 | 103 | 127 | 165 | 232 | 264 |
| Cluster | 73 | 109 | 122 | 151 | 163 | 198 |
| Select | 70 | 116 | 132 | 163 | 209 | 245 |
| Control | 55 | 129 | 181 | 278 | 405 | 444 |

表 7 西行路径误差统计 (单位: km)

Table 7 The mean errors (km) of ensemble forecast for a tropical cyclone with westward track type based on different analysis methods

| 分析方法 Analysis method | 时间 Time | | | | | |
|-------------------------|---------|------|------|------|------|------|
| | 12 h | 24 h | 36 h | 48 h | 60 h | 72 h |
| Full Ens | 77 | 118 | 149 | 198 | 229 | 240 |
| Cluster | 74 | 104 | 90 | 101 | 150 | 221 |
| Select | 75 | 124 | 151 | 190 | 229 | 233 |
| Control | 55 | 79 | 106 | 133 | 153 | 197 |

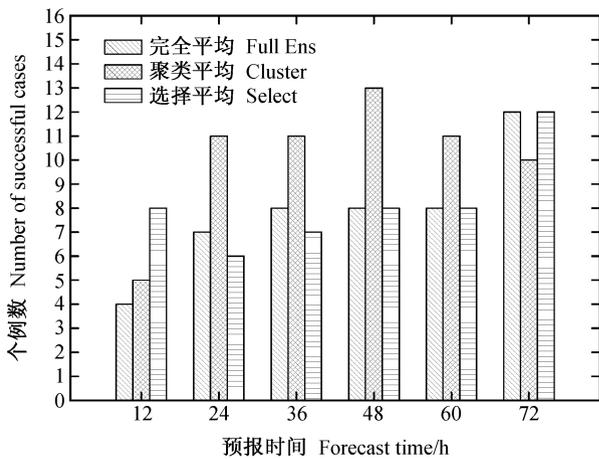


图 4 各时次路径集合预报成功个例统计

Fig. 4 The number of successful cases for track ensemble forecasting at different forecast time

这说明本文的人造台风方案也具有了较高的预报水平。在三种分析方法中, 聚类平均方法具有最小的预报误差, 完全平均和选择平均方法预报水平相似。将各时次集合预报误差比控制预报误差小的视为成功的个例, 从图 4 可见, 每时次至少有一半的个例误差小于控制预报误差, 因此, 可以认为本文的热带气旋集合预报系统在路径预报上是成功的。

进一步从表 2 分析可见, 16 个台风个例中西行路径 (包括西北行) 和转折路径各有 7 个, 因此对两类台风路径进行单独分析, 可以看出影响平均预报误差的来源主要为哪类。从表 6、7 可见, 集合预报对转向台风的路径预报误差提高非常明显, 而西行台风除聚类分析方法在个别时次误差小于控制预报外, 其余均大于控制预报误差。同样分析表 2, 若将热带气旋以 960 hPa 为界按强度进行分类, 其中较强台风有 10 个 (中心气压 ≤ 960 hPa), 较弱台风 6 个, 分别进行统计 (表 8、9) 可见, 集合预报对较强台风的改进比对较弱台风的改进明显。

集合预报的应用之一是估计某一天气事件的概率分布,对于热带气旋来讲,首先想到的是集合预报结果是否将热带气旋真实路径包含其中,由于热带气旋移动路径是一个二维问题,包括移向和移速。因此,对热带气旋集合预报结果的分析也应包含这两方面的内容,即移向何处?何时到达?图5为对本文16个台风个例统计的百分比,图5a显示对移向的统计,各统计时刻均超过了65%,其中第54小时达到了100%。图5b为移速的统计,可见每个统计时次至少有一半的个例包含了观测真值,

在预报的中间时段,更是超过了90%,因此可以认为对移速和移向的预报是成功的。

定义指数 RSS (Relative Skill Score):

$$I_{RSS} = \frac{E_c - E_e}{E_c + E_e} \times 100\%, \quad (9)$$

E_c 、 E_e 分别表示控制预报与集合预报路径预报误差。指数正值表示集合预报误差小于控制预报误差,其大小反映了提高(降低)的程度。表10为不同分析方法在各时次的 RSS 评分情况。除聚类3以外,其他分析方法在预报的后半段得分为正的情况居多,这与表5是吻合的。

表8 较强台风集合预报路径误差统计(单位: km)

Table 8 The mean errors (km) of ensemble forecast for a strong tropical cyclone based on different analysis methods

| 分析方法 Analysis method | 时间 Time | | | | | |
|-------------------------|---------|------|------|------|------|------|
| | 12 h | 24 h | 36 h | 48 h | 60 h | 72 h |
| Full Ens | 72 | 109 | 139 | 189 | 244 | 250 |
| Cluster | 70 | 92 | 115 | 143 | 186 | 208 |
| Select | 75 | 122 | 153 | 197 | 249 | 250 |
| Control | 57 | 108 | 146 | 226 | 303 | 354 |

表10 各分析方法路径预报 RSS 平均得分

Table 10 The mean RSS scores for the track forecast based on different analysis methods

| 预报时间 Time/h | 完全平均 | 聚类1 | 聚类2 | 聚类3 | 选择平均 |
|----------------|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | Full Ens | Cluster 1 | Cluster 2 | Cluster 3 | Select |
| 6 | -14.9(4) | -21.37(2) | -19.14(4) | -16.58(2) | -24.51(5) |
| 12 | -9.59(5) | -14.65(5) | -11.77(5) | -5.99(4) | -13.93(5) |
| 18 | -7.09(3) | -7.14(6) | -13.31(4) | -10.67(4) | -13.27(4) |
| 24 | -3.71(8) | -4.03(8) | -10.48(5) | -5.14(6) | -11.08(5) |
| 30 | -2.09(8) | -3.68(5) | -7.78(7) | -3.07(6) | -9.31(4) |
| 36 | 1.51(8) | 0.64(8) | -6.63(6) | 6.49(8) | -5.97(5) |
| 42 | 7.27(10) | 4.47(11) | -2.35(7) | 5.63(11) | -1.55(9) |
| 48 | 7.18(9) | 1.86(8) | -1.84(7) | 7.96(9) | 0.59(8) |
| 54 | 6.44(8) | 4.92(7) | 1.99(8) | 9.77(8) | 4.78(8) |
| 60 | 4.37(9) | 2.36(6) | -3.91(7) | 5.81(9) | 1.67(7) |
| 66 | 6.35(11) | 0.87(6) | 1.58(9) | 0.55(8) | 4.31(11) |
| 72 | 11.6(12) | 3.5(8) | 6.55(9) | 7.76(10) | 7.15(12) |

表9 较弱台风集合预报路径误差统计(单位: km)

Table 9 The mean errors (km) of ensemble forecast for a weak tropical cyclone based on different analysis methods

| 分析方法 Analysis method | 时间 Time | | | | | |
|-------------------------|---------|------|------|------|------|------|
| | 12 h | 24 h | 36 h | 48 h | 60 h | 72 h |
| Full Ens | 75 | 128 | 167 | 190 | 207 | 252 |
| Cluster | 81 | 128 | 101 | 105 | 118 | 234 |
| Select | 67 | 128 | 160 | 194 | 225 | 248 |
| Control | 59 | 102 | 148 | 189 | 267 | 258 |

注: 括号内数字为得分为正的个数。

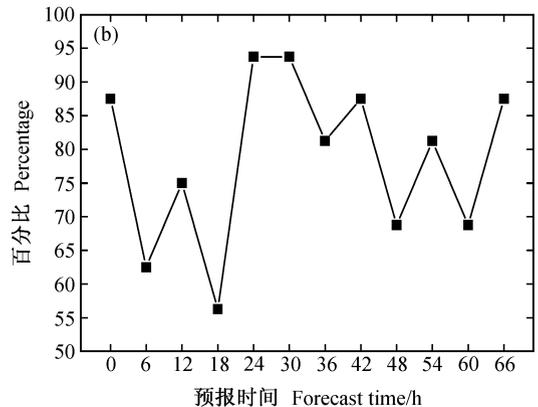
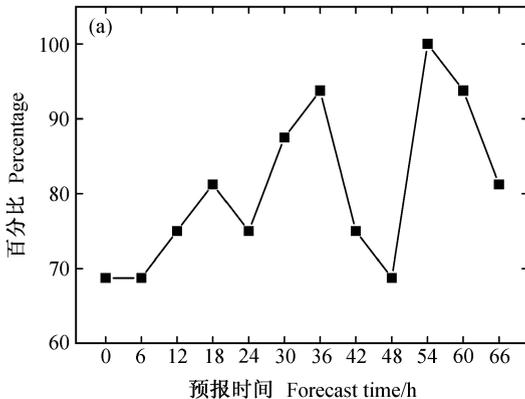


图5 集合成员预报结果包含真实热带气旋路径的个例百分比统计: (a) 移向; (b) 移速

Fig. 5 Percentage of cases in which the forecast ensemble spans the true trajectory of the tropical cyclone for all cases: (a) moving direction; (b) moving speed

4 结论与讨论

本文建立了基于集合 Kalman 滤波数据同化的热带气旋集合预报系统, 集合为同化提供背景场误差协方差矩阵的计算样本, 同化结果为集合预报提供初始成员。集合与同化相互依存, 共同为热带气旋集合预报的预报概率密度函数估计服务, 完整体现了集合同化一体化的思想。本文的分析表明, 该方法简单易操作, 且取得了较好的预报效果, 但同时也指出了未来需要努力的方向。首先需要研究更加合理的扰动方法, 增加初始场的离散度。本文的初始资料仅为 NCEP 的 grib 资料, 未来可以考虑将不同的大尺度资料联合使用, 如 ECMWF、ETA Model 资料等, 这样可以通过初始资料在大尺度的位相和振幅上差异来增加成员间的离散度。另一个途径是增加模式的分辨率。这样可以对小尺度的过程进行描述, 同时减小对物理参数的依赖。此外, 考虑多模式的集合也是增加集合离散度的方案之一, 通过同一模式的参数扰动构造的物理集合方案, 不可避免地造成成员间的相关性过大。另一个需要努力的方向是对集合 Kalman 滤波同化算法进行深入的研究。针对 EnKF 所面临的不满秩、滤波发散、不平衡以及集合成员数的问题进行研究, 观测误差协方差矩阵的构造以及截断半径的选择还需要经过更多的试验来确定。同时, 本文的 EnKF 只进行了一个过程, 还没有对预报误差协方差矩阵进行分析, 也就是还没有体现 EnKF 的“流变”协方差矩阵的优势, 因此, 本文的集合 Kalman 滤波数据同化只完成了一部分, 需要通过不断的努力完成循环同化的完整 EnKF 流程。此外, 对预报结果的后处理还需要进行研究。由于存在样本数不足的情况, 对路径预报未能进行修正, 因此需要通过更加多的训练样本, 对不同的路径特征, 如西行、转向等类型的台风路径分别得到不同的修正系数。同时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 (References)

[1] Epstein E S. Stochastic dynamic prediction. *Tellus*, 1969, **21**: 739~759

- [2] Leith C E. Theoretical skill of Monte Carlo forecasts. *Mon. Wea. Rev.*, 1974, **102**: 409~418
- [3] Toth Z, Kalnay E. Ensemble forecasting at NMC: The generation of perturbations. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 1993, **74**: 2317~2330
- [4] Tracton M S, Kalnay E. Operational ensemble prediction at the National Meteorological Center: Practical aspects. *Wea. Forecasting*, 1993, **8**: 379~398
- [5] Molteni F, Buizza R, Palmer T N, et al. The ECMWF ensemble prediction system: Methodology and validation. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 1996, **122**: 73~119
- [6] Zhang Z, Krishnamurti T N. Ensemble forecasting of hurricane tracks. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 1997, **78**: 2785~2795
- [7] Zhang Z, Krishnamurti T N. A perturbation method for hurricane ensemble predictions. *Mon. Wea. Rev.*, 1999, **127**: 447~469
- [8] Cheung K K W, Chan J C L. Ensemble forecasting of tropical cyclone motion using a barotropic model. Part II: Perturbations of the vortex. *Mon. Wea. Rev.*, 1999, **127**: 2617~2640
- [9] Puri K, Barkmeijer J, Palmer T N. Ensemble prediction of tropical cyclone using targeted diabatic singular vectors. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 2001, **127**: 709~731
- [10] 周霞琼, 端义宏, 朱永祺. 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*, 2003, **19**: 1~8
Zhou Xiaqiong, Duan Yihong, Zhu Yongqi. The ensemble forecasting of tropical cyclone motion I: Using a primitive equation barotropic model. *Journal of Tropical Meteorology* (in Chinese), 2003, **19**: 1~8
- [11] 曾中一. 气象资料同化. 台北: 渤海堂出版, 1997. 594pp
Zeng Zhongyi. *Meteorology Data Assimilation* (in Chinese). Taipei: Bokaido Press, 1997. 594pp
- [12] Evensen G. Sequential data assimilation with a nonlinear quasi-geostrophic model using Monte Carlo methods to forecast error statistics. *J. Geophys. Res.*, 1994, **99** (C5): 10143~10162
- [13] 刘成思, 薛纪善. 关于集合 Kalman 滤波的理论和方法的发展. *热带气象学报*, 2005, **21**: 628~633
Liu Chengsi, Xue Jishan. The ensemble kalman filter theory and method development. *Journal of Tropical Meteorology* (in Chinese), 2005, **21**: 628~633
- [14] Braun S A, Tao W K. Sensitivity of high-resolution simulations of Hurricane Bob (1991) to planetary boundary layer parameterizations. *Mon. Wea. Rev.*, 2000, **128**: 3941~3961
- [15] 王建捷, 胡欣, 郭肖容. MM5 模式中不同对流参数化方案的比较试验. *应用气象学报*, 2001, **12**: 41~53
Wang Jianjie, Hu Xin, Guo Xiaorong. Comparison experiments on cumulus parameterization schemes of the MM5.

- Journal of Applied Meteorological Science* (in Chinese), 2001, **12**: 41~53
- [16] 邓国, 周玉淑, 李建通. 台风数值模拟中边界层方案的敏感性试验 I. 对台风结构的影响. *大气科学*, 2005, **29**: 417~428
Deng Guo, Zhou Yushu, Li Jiantong. The experiments of the boundary layer schemes on simulated typhoon. Part I. The effect on the structure of typhoon. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2005, **29**: 417~428
- [17] Stensrud D J, Bao J W, Warner T T. Using initial condition and model physics perturbations in short-range ensemble simulations of mesoscale convective systems. *Mon. Wea. Rev.*, 2000, **128**: 2077~2107
- [18] Frederick A E. Effective mesoscale, short-range ensemble forecasting. Ph. D. dissertation, University of Washington, 2003
- [19] Zou X L, Xiao Q N. Studies on the initialization and simulation of a mature hurricane using a variational bogus data assimilation scheme. *J. Atmos. Sci.*, 2000, **57**: 836~860
- [20] 中国气象局. 台风年鉴 (2003~2004). 北京: 气象出版社, 2004~2005
China Meteorological Administration. *Typhoon Yearbooks* (2003-2004) (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 2004~2005
- [21] 黄小刚, 陆汉城, 费建芳, 等. 投影网格中的坐标确定及在台风数值试验中的应用. *热带气象学报*, 2004, **20**: 605~608
Huang Xiaogang, Lu Hancheng, Fei Jianfang, et al. A method to pinpoint the known point coordinate in the rectangular grid and its contribution to tropical cyclone track simulation. *Journal of Tropical Meteorology* (in Chinese), 2004, **20**: 605~608
- [22] Kurihara Y, Bender M A, Ross R J. An initialization scheme of hurricane models by vortex specification. *Mon. Wea. Rev.*, 1993, **121**: 2030~2045
- [23] Evensen G. Sampling strategies and square root analysis schemes for EnKF. *Ocean Dynamics*, 2004, **54**: 539~560
- [24] Goerss J S. Tropical cyclone track forecasts using an ensemble of dynamical models. *Mon. Wea. Rev.*, 2000, **128**: 1187~1193