智协飞,朱寿鹏,孙晶,等.2015.基于 BGM 与 ETKF 的台风“苏拉”(1209)集合预报的对比试验Ⅰ:路径预报[J].大气科学学报,38(6):776-784. doi:10. 13878/j.cnki.dqkxxb.20150420002.

Zhi Xie-fei,Zhu Shou-peng,Sun Jing,et al.2015.Comparative experiments of ensemble forecasting of typhoon Saola(1209) based on BGM and ETKF,Part Ⅰ:Track forecast[J].Trans Atmos Sci,38(6):776-784.(in Chinese).

基于 BGM 与 ETKF 的台风“苏拉”(1209)集合预报的对比试验Ⅰ:路径预报

智协飞[1,2],朱寿鹏[1],孙晶[3],王玉虹[1],胡航菲[4]

(1.南京信息工程大学 大气科学学院,江苏 南京 210044;2.南京信息工程大学 气象灾害预报预警与评估协同创新中心,江苏 南京 210044;
3.山东省气象局,山东 济南 250031;4.河南省安阳市气象局,河南 安阳 455000)

摘要:采用 FNL 再分析资料和美国联合台风警报中心(Joint Typhoon Warning Center,JTWC)资料,运用中尺度 WRF(Weather Research and Forecasting)模式,分别使用增长模繁殖法(Breeding of Growing Mode,BGM)和集合卡尔曼变换方法(Ensemble Transform Kalman Filter,ETKF),对 1209 号台风“苏拉”进行了台风路径的集合预报试验,并对预报效果进行对比分析。结果表明:采用 BGM 或 ETKF 初始扰动的集合预报系统,集合平均预报对风场、温度场、位势高度场的预报效果均优于控制预报;ETKF 方法的预报改进程度较 BGM 方法更大,且对风场和温度场预报技巧的优势尤为明显。BGM 方法所得到的集合成员离散度小于 ETKF 方法,对大气真实状态的表征能力不及后者;两种扰动方法的集合平均都明显改善了台风“苏拉”的路径预报结果,尤其是控制预报在福建沿海第二次登陆后移速过快的问题,但对台风登陆位置预报的改进不明显;此外,采用 ETKF 方法的集合平均对台风“苏拉”路径预报的改进效果远优于采用 BGM 方法的集合平均预报。

关键词:台风“苏拉”;BGM;ETKF;集合预报;路径预报

文章编号:1674-7097(2015)06-0776-09 **中图分类号**:P456. 7 **文献标志码**:A

doi:10. 13878/j.cnki.dqkxxb.20150420002

Comparative experiments of ensemble forecasting of typhoon Saola(1209) based on BGM and ETKF,Part Ⅰ:Track forecast

ZHI Xie-fei[1,2],ZHU Shou-peng[1],SUN Jing[3],WANG Yu-hong[1],HU Hang-fei[4]

(1.School of Atmospheric Sciences,NUIST,Nanjing 210044,China;
2.Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters,Nanjing 210044,China;
3.Shandong Meteorological Bureau,Jinan 250031,China;4.Anyang Meteorological Bureau of Henan Province,Anyang 455000,China)

Abstract:Based on the FNL reanalysis data and U.S. Joint Typhoon Warning Center(JTWC) tropical cyclone data, the WRF(Weather Research and Forecasting) model is employed to establish the ensemble prediction system for the typhoon Saola(1209) based on the initial perturbation methods of Breeding of Growing Mode(BGM) and Ensemble Transform Kalman Filter(ETKF),respectively.The ensemble forecasting experiments for the typhoon track are conducted.It is detected that the ensemble mean forecasting results using either BGM or ETKF perform much better than control forecasting results

收稿日期:2015-04-20;**改回日期**:2015-10-26

基金项目:公益性行业(气象)科研专项(GYHY200906009);国家重大基础科学研究计划(973 计划)项目(2012CB955200);江苏高校优势学科建设工程资助项目(PAPD);江苏省“青蓝工程”(东亚季风与区域气候变化)

通信作者:智协飞,博士,教授,研究方向为数值天气预报及短期气候预测,zhi@ nuist.edu.cn.

in the aspects of wind, temperature and geopotential height fields. And the ETKF method is superior to the BGM method, especially in the aspects of wind and temperature fields. Results show that the dispersions of ensemble forecast system using BGM method are smaller than those using ETKF method. The BGM ensemble forecast system has a fairly limited ability to describe the whole atmosphere. Additionally, the ensemble mean track forecasts based on BGM and ETKF are both superior to the control forecast, and well manage the problem of faster speed after the second landfall in Fujian coast for the control forecast. However, for the landfall location, the predictions by means of the two methods are not so satisfactory. In addition, the ETKF method is considerably better than the BGM method in the ensemble track prediction of typhoon Saola.

Key words: typhoon Saola; BGM; ETKF; ensemble forecast; track forecast

0　引言

Lorenz(1963a, 1963b, 1963c; 1965)提出,大气是一个混沌系统,数值预报对大气初始状态具有高度的敏感性。即便模式变得更为完善,由于模式和初始条件存在无法避免的误差,数值模式的预报技巧依然有限。初始状态的不确定性,可能使数值预报结果在较短的预报时间段内远离真实大气(Toth, 1991, 2001; Lorenz, 1995)。Leith(1974)将 Lorenz 的非线性理论与 Epstein(1969)的动力随机预报理论相结合,提出了集合预报理论。

集合预报通过对初始状态的误差范围估计,给出初值集合,再根据这个初始状态集合,通过数值模式计算得到集合中各初值元素相应的预报结果,组成预报结果集合。在得到预报结果集合后,通过对预报结果集合的信息提取分析,最终得到预报产品(陈静等,2002;段明铿和王盘兴,2004)。在集合预报中,需要生成一些微小的扰动叠加到原始场上,包括动力场、热力场等。集合预报扰动方法是其核心问题,扰动质量的好坏直接影响到集合预报的质量(陈静等,2002;张涵斌等,2014a, 2014b)。近年来,集合预报理论不断发展,各种集合扰动方法也层出不穷(Toth and Kalnay, 1993, 1997; Buizza and Palmer, 1995; Bishop et al., 2001; Ma et al., 2009)。大量研究表明,集合预报的预报技巧明显高于单样本预报,且模式分辨率的提高在一定程度上有助于改进预报效果(段明铿等,2012;孙照渤等,2013;朱春子等,2013;孙晶,2014;滕华超等,2014)。

对于使用增长模繁殖法(Breeding of Growing Modes, BGM)的集合预报系统,已有研究表明,扰动增长模在繁殖 3~4 d 后即可呈现明显的饱和特征,不同变量扰动增长模的饱和时间有所差别,同一变量在不同等压面上饱和时间亦不同步,不同的初始模大小也会对扰动饱和过程产生影响(于永锋和张立凤, 2005)。智协飞等(2015)基于 WRF(Weather Research and Forecasting)模式,使用 BGM 方法建立了一个台风集合预报系统,并将集合预报结果与 TIGGE(Thorpex Interactive Grand Global Ensemble)资料所提供的多个中心的预报进行集成,集成结果始终表现出较好的预报性能,显著减小了预报误差。

马旭林等(2008)研究建立了基于集合卡尔曼变换(Ensemble Transform Kalman Filter, ETKF)方法产生集合初始扰动方案的 GRAPES(Global and Regional Assimilation and Prediction System)全球集合预报系统。结果表明,ETKF 全球集合初始扰动能够较好地反映分析误差方差的主要模态结构和扰动振幅,并具有比较合理的集合离散度,整个集合预报系统显示出良好的发展前景和应用潜力。Zhang et al.(2015a, 2015b)基于中国国家气象局区域模式(GRAPES-Meso)集合预报系统,分析比较了 ETKF 初值扰动方法和降尺度方法,结果表明 ETKF 扰动能够充分表现真实大气的发展趋势,并有效提高了 GRAPES-Meso 区域集合预报系统的预报技巧。

针对台风路径的预报,Zhi et al.(2011)的研究表明,单模式的预报结果一般误差较大,而多模式集成预报能够显著改善台风路径的预报技巧。同时,周文友和智协飞(2012)使用多模式加权消除偏差集合平均方法,有效改进了台风路径的预报效果。最近,He et al.(2015)利用卡尔曼滤波方法所做的多模式集成预报,对台风的路径和强度预报也都有明显改进。

本文分别采用 ETKF 和 BGM 方法作为初始扰动方案,建立基于 WRF 模式的集合预报系统,并进行 2012 年 09 号台风"苏拉"(国际编号 1209)的路径集合预报试验,对各要素场的预报效果进行检验,并对两种方法所做的台风路径预报效果进行对比分析,为今后中尺度集合预报初始扰动方法的选取提

供参考依据。

1 资料与方法

1.1 资料

本文使用美国国家环境预报中心(NCEP)/国家大气研究中心(NCAR)提供的 FNL 再分析资料生成分析场作为初值进行控制预报,以及集合预报过程中 WRF 模式的启动和侧边界条件的更新,所取时间为 2012 年 7 月 27 日到 8 月 5 日(世界时,下同),时间间隔 6 h,分辨率为 1°×1°。

同时,选取美国联合台风警报中心(the Joint Typhoon Warning Center,JTWC)的逐 6 h 热带气旋资料,用于对预报技巧的评估与对预报的检验。

1.2 方法

1.2.1 增长模繁殖法

增长模繁殖法以 NCEP 为代表,在已有数值预报模式的基础上,通过模式的繁殖循环捕获最快增长模,然后产生集合预报的初始扰动(Toth and Kalnay,1993,1997;关吉平等,2003;关吉平和张立凤,2006)。在实际计算中,BGM 首先对初始场叠加一个随机扰动,再运用模式对其进行一定时段的预报,将控制预报减去扰动预报的差值调整后作为下一次计算的扰动量,如此循环反复使用,最终生成初始场。通过这种误差的循环增长,可以使高速增长型误差的比重不断增大直至饱和。

1.2.2 集合卡尔曼变换方法

根据集合卡尔曼变换理论(Bishop et al.,2001),Wang and Bishop(2003)发展了用集合卡尔曼变换方法生成初始扰动进行集合预报的方法。ETKF 方法最早是针对适应性观测问题提出的,后被用于集合预报中生成初始扰动场(Wei et al.,2006;Ma et al.,2009;马旭林等,2014)。他用集合扰动近似表示预报和分析误差的协方差矩阵,从而构造集合初始扰动。理论上,ETKF 初始扰动方法产生的集合扰动在观测空间具有等概率分布的特征,其计算量一般较小。

1.2.3 相对技巧评分

在均方根意义上,集合预报系统的表现可用相对技巧评分(Relative Skill Score,RSS)定量表示:

$$S_{\mathrm{RSS}}=\frac{E_{\mathrm{ctl}}-E_{\mathrm{ens}}}{E_{\mathrm{ctl}}}\times 100\%。\qquad(1)$$

式中:S_{RSS}表示 RSS;E_{ctl}和 E_{ens}分别表示控制预报和集合平均预报的误差。S_{RSS}是无量纲量。S_{RSS}为正值,表明集合平均预报的误差水平低于控制试验预报值的误差水平,表示集合平均预报能够改善控制预报;反之,若 S_{RSS}为负值,则说明控制试验预报值的结果要优于集合成员预报的平均值。

1.2.4 离散度

离散度(Ensemble Spread)是指扰动预报与集合平均预报之间的平均距离,反映他们的总体差异大小。离散度一般可用各个集合成员与集合平均预报的均方根误差(Root Mean Square Error,RMSE)度量,其计算公式为:

$$S_{\mathrm{ES}}(t)=\overline{\left(\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(f_i(t)-f_m(t))^2\right)^{\frac{1}{2}}}。\qquad(2)$$

式中:S_{ES}表示离散度;N 为集合成员数;$f_i(t)$和 $f_m(t)$分别表示集合成员预报和集合平均预报,"——"表示格点平均。离散度可以用来度量集合预报的不确定性,离散度较集合平均的 RMSE 增长偏慢将使集合成员漏掉大气真实状态的概率增大,在随后的预报中再次捕获真实大气的概率则降低。

1.2.5 Talagrand 分布

Talagrand et al.(1997)认为,原则上集合成员具有相同的可能性代表未来的天气状况,即实况值落在各个成员附近的概率是相等的,判断一个好的集合预报系统的标准是每个预报成员发生的概率都是相同的。

Talagrand 分布的基本原理为:在某一预报时效,某格点上 N 个集合成员对某要素的预报值按从小到大的顺序排列记为 $x_1\leqslant x_2\leqslant\cdots\leqslant x_N$,则观测值 x_a 必定落在(N+1)个区间的某个区间内。假设样本数足够多,那么观测值落在 x_i 和 x_{i+1}之间的概率 f_i 应趋于平均概率,即 $f(x_a\leqslant x_1)=f(x_1\leqslant x_a\leqslant x_2)=\cdots=f(x_N\leqslant x_a)=1/(N+1)$。

因此,Talagrand 分布可以用来检验集合预报的可靠性,并能够度量集合预报的离散度适宜性和成员等同性。理想的 Talagrand 分布是一条平直的水平线,但目前大多数情况下,落在两端的概率要比落在中间的概率稍大,说明集合预报成员间的离散程度不够。这是目前集合预报的普遍问题,也是影响集合预报系统效果的一个较为关键的问题。

2 模式方案

2.1 模式与物理过程参数化方案

本文使用中尺度 WRF 模式 V3.6.1 版本,采用双重嵌套网格,区域中心分别位于(120°E,35°N)和(117°E,32°N),垂直方向为 28 层。粗网格格距为 30 km,格点数为 371×260;细网格格距为 10 km,格

点数为 190×304。模式顶为 50 hPa,内外两层采用相同的参数化方案(表 1)。

表 1　WRF 模式所采用的物理过程参数化方案

Table 1　Parameterization schemes of physical processes used in the WRF model

物理过程	参数化方案
短波辐射	Dudhia
长波辐射	RRTM
云物理过程	Lin
积云对流	浅对流 Kain-Fritsch(new Eta)
边界层	YSU
近地面	MM5 Monin-Obukhov
陆面过程	Noah 陆面参数化

集合预报起报时刻为 2012 年 8 月 1 日 12 时,时间步长为 60 s,共积分 48 h。外层网格数据每 6 h 输出一次,内层网格数据每 3 h 输出一次。控制预报以 FNL 资料生成分析场作为初值进行常规预报,侧边界条件每 6 h 更新一次。

2.2　集合预报扰动方案

2.2.1　BGM 方法

采用 BGM 方法对动力场、热力场和湿度场进行初始扰动,扰动步骤具体如下(Toth and Kalnay,1993,1997;关吉平等,2003):

1)选取 NCEP/NCAR 的 2012 年 7 月 29 日 12 时的 FNL 资料得到模式的分析场,对分析场的纬向风 U、经向风 V、位温 T、水汽 Q 和位势高度 Z,分别加上和减去一个正态分布的随机扰动,输入到模式中进行循环积分;

2)繁殖模为加扰预报与减扰预报的差值除以 2,经尺度调整到与初始误差相同量级,取繁殖循环的周期为 6 h,繁殖时长为 72 h,到 8 月 1 日 12 时得到最快增长模,并分别在该时次的模式分析场上加上和减去这个最快增长模,就能得到一个加扰场和一个减扰场;

3)再取 6 次不同的随机扰动进行上述过程,就可以得到总共 7 个加扰场和 7 个减扰场,共 14 个扰动初始场,将其输入到模式中积分 48 h,得到 14 个集合预报成员;

4)对这 14 个集合预报成员与控制预报求取数学平均,即得到 BGM 方法集合平均预报。

2.2.2　ETKF 方法

采用 ETKF 方法对动力场、热力场和湿度场进行初始扰动,扰动步骤具体如下(Wang and Bishop,2003;马旭林等,2008;Ma et al.,2009):

1)选取 NCEP/NCAR 的 2012 年 7 月 27 日 00 时的 FNL 资料得到模式的分析场,用蒙特卡罗法生成 14 组小扰动,同样叠加到模式分析场的 U、V、T、Q 和 Z 上,即得到该时刻的 14 个随机扰动初值场;

2)将得到的 14 个扰动初值场输入到模式中,积分 12 h 得到 27 日 12 时的 12 h 预报场,将 14 个成员预报与集合平均预报相减得到该时刻的 12 h 预报扰动,由卡尔曼滤波公式计算出变换矩阵和放大因子,这样就可以由预报扰动得到经过 ETKF 更新的 27 日 12 时的 14 个分析扰动,将这 14 个分析扰动加到模式分析场上,即得到 27 日 12 时的 14 个扰动初值场。

3)重复上述做法,经过 4 天的循环,到 8 月 1 日 12 时放大因子趋于稳定,得到 14 个较为合理稳定的扰动初始场,将其输入到模式中积分 48 h,得到 14 个集合预报成员;

4)对这 14 个集合预报成员与控制预报求取数学平均,即得到 ETKF 方法集合平均预报。

3　集合预报效果检验

3.1　RSS 检验

根据 500 hPa 高度上纬向风场(U)、温度场(T)和位势高度场(Z)的 RSS 随时间的变化(图 1),可以看到,在 48 h 预报时效内,两种集合预报初始扰动方法对上述三个变量的 RSS 均呈现出正技巧,集合成员预报平均值优于控制试验预报结果。同时,随着预报时间的延伸,U 和 T 的 RSS 有所减小,Z 的 RSS 明显增大,且整体大于 U 和 T,即集合平均预报对 Z 的改进幅度要大于 U 和 T。

由两种扰动方法集合平均预报对 500 hPa 高度 U、T 和 Z 场的 RSS 最小值、最大值与平均值的对比(表 2)可以看到,对 U 和 T 而言,ETKF 的 RSS 最大、最小、平均值均大于 BGM 方法,且幅度明显,而对于 Z 的预报结果,尽管 ETKF 方法的 RSS 极值小于 BGM,但其均值依然大于 BGM 方法的 RSS 均值。因此可以认为,ETKF 方法对 U、T 和 Z 的预报效果均优于 BGM 方法,且对 U 和 T 预报技巧的优势尤为明显。

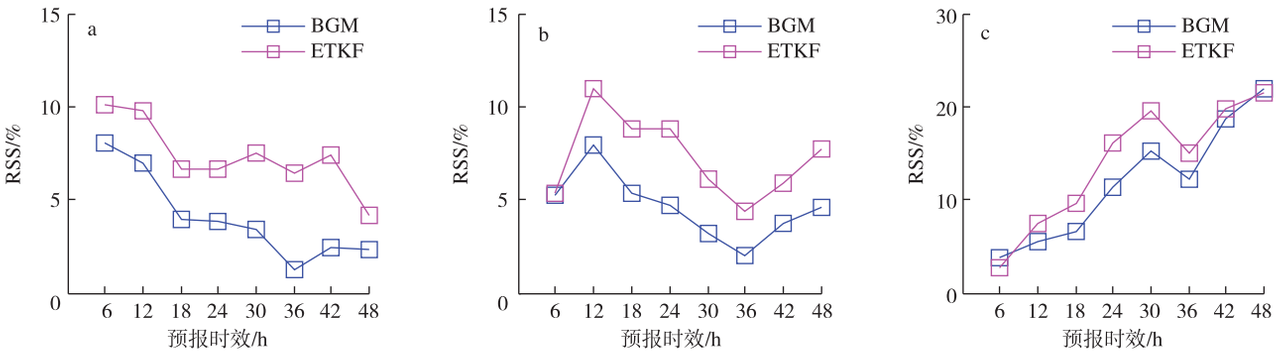

图 1 基于 BGM 与 ETKF 初始扰动方法的集合平均预报对 500 hPa 上 U(a)、T(b)、Z(c)场的 RSS 随预报时效的变化

Fig.1 RSS variations of (a) U, (b) T and (c) Z at 500 hPa with the forecast lead time by ensemble forecasts based on the initial perturbation methods of BGM and ETKF

表 2 基于 BGM 与 ETKF 初始扰动方法的集合平均预报对 500 hPa 上 U、T 和 Z 场的 RSS 最小值、最大值及平均值

Table 2 RSS minimum, maximum and mean values of U, T and Z at 500 hPa with the forecast lead time by ensemble forecasts based on the initial perturbation methods of BGM and ETKF %

RSS	扰动方法	U	T	Z
最小值	BGM	1.3	2.0	3.6
	ETKF	4.1	4.4	3.0
最大值	BGM	8.1	7.9	21.8
	ETKF	10.1	10.9	21.4
平均值	BGM	4.0	4.6	11.9
	ETKF	7.3	7.2	13.9

3.2 Talagrand 分布

根据 BGM 初始扰动方法集合预报结果中 12、24、48 h 预报各高度层 U、T、Z 的 Talagrand 分布情况(图略),在三个预报时效中,U 和 T 的 Talagrand 分布形态在各个高度层均呈“U”型,Z 的 Talagrand 分布形态在高层呈“L”型,中层呈“U”型,低层呈反“L”型。三个预报时效的 U、T、Z 的 Talagrand 分布显示,集合预报系统对高层气象要素的离散程度要好于低层。

图 2 为 ETKF 初始扰动方法的集合预报 12、24、48 h 预报时效各高度层 U、T 和 Z 的 Talagrand 分布,平均概率为 0.063。在 12 h 预报中,U 和 T 的 Talagrand 分布形态高层呈“U”型,中低层呈“L”型,在中低层集合成员的 U 和 T 的预报值整体较观测值偏大,Z 的 Talagrand 分布呈高层“L”型,中层“U”型,低层为反“L”型,说明集合成员对 Z 的预报值在高层整体较观测值偏大,在低层则较观测值偏小;在 24 h 预报中,U 的 Talagrand 分布在各个高度层均呈“U”型,T 和 Z 的 Talagrand 分布与 12 h 预报结果类似;在 48 h 预报中,U 的 Talagrand 分布形态在各个高度层仍呈“U”型,T 的 Talagrand 分布主要呈“L”型,说明在整层大气中集合成员对 T 的预报值均偏大,而集合成员对 Z 的预报值在高层偏大,低层偏小。

在两种初始扰动方法所得到 U、T 和 Z 集合预报的 Talagrand 分布中,漏报概率都大于平均概率,且高层的漏报概率要小于低层,说明集合预报系统离散度存在不足,但高层的离散度要优于低层。同时,对比发现,BGM 方法在各预报时效各高度层的漏报概率均明显大于 ETKF 方法的结果。因此,采用 ETKF 方法的集合预报系统的离散度要优于采用 BGM 方法的集合预报系统。

3.3 离散度

从 850 hPa 高度上 U、T、Z 的离散度和 RMSE 随预报时间的变化情况(图 3)可以看到,BGM 和 ETKF 集合预报系统中,对流层低层 U 和 T 的离散度随预报时间的增长均较集合平均的 RMSE 的增长偏慢,Z 的离散度随预报时间的增长与集合平均 RMSE 的增长较为接近。低层 U 和 T 的离散程度有所不足,Z 的离散程度则较大,各集合成员对低层 Z 的预报值可以较好地表现大气的真实状态。同时,采用 BGM 方法的低层 U、T 和 Z 的离散度增长速度均比采用 ETKF 方法的增长速度慢。

通过比较控制预报、分别基于 BGM 和 ETKF 初始扰动方法的集合平均预报三种预报结果的 RMSE 可以看出,两种集合平均相对控制预报均有所改进。对 U 和 T,BGM 方法集合平均对控制预报的改进程度有限,ETKF 的改进较为明显;同时,两种集合预报初始扰动方法对 Z 的预报改进均较为

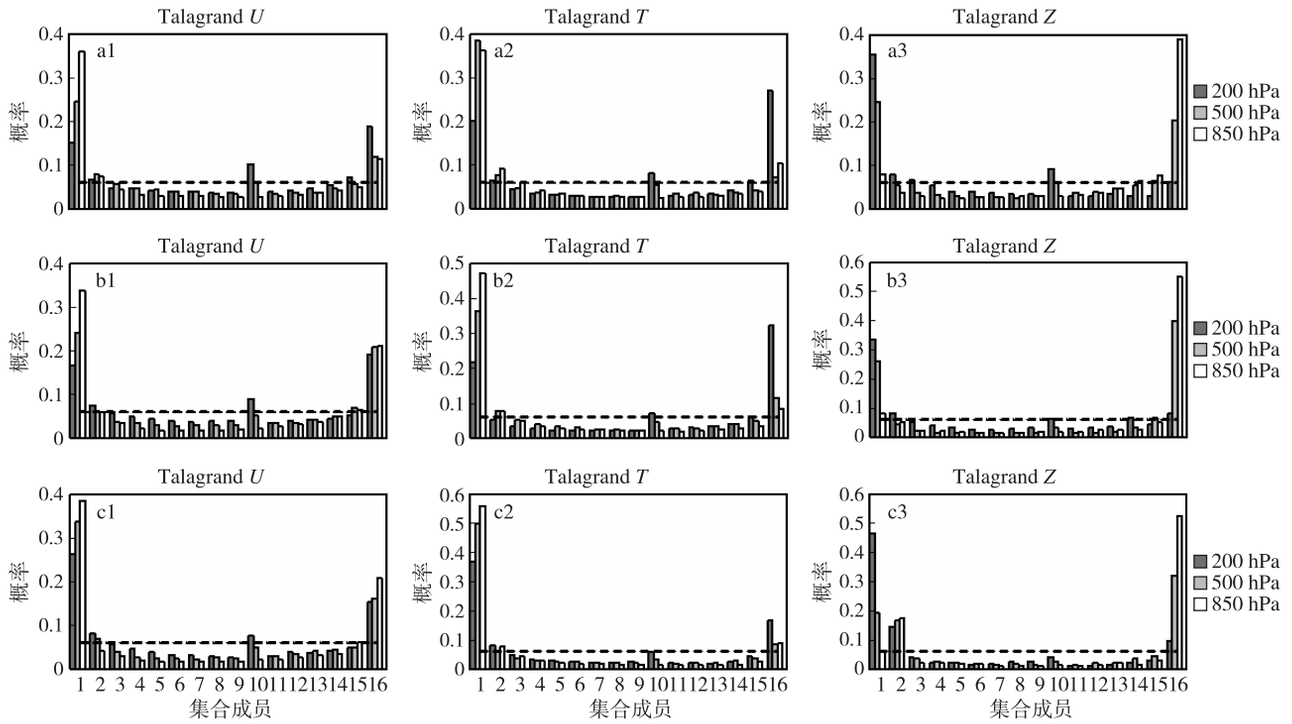

图 2　基于 ETKF 初始扰动方法的集合预报系统对 200、500、850 hPa 上 U、T、Z 的 12(a1、a2、a3)、24(b1、b2、b3)、48(c1、c2、c3)h 预报的 Talagrand 分布

Fig.2　Talagrand distributions of U, T and Z for forecast lengths of (a1, a2, a3) 12, (b1, b2, b3) 24 and (c1, c2, c3) 48 h at 200, 500 and 850 hPa in the ensemble forecast system based on the initial perturbation method of ETKF

显著,ETKF 方法优于 BGM 方法。总体而言,在表现大气低层要素场真实状态的能力方面,BGM 方法所得到的集合扰动成员不及 ETKF 方法,且在预报误差方面,ETKF 方法集合平均的 RMSE 小于 BGM 方法,即对要素场的预报误差较小。

3.4　集合预报效果对比

采用 BGM 或 ETKF 初始扰动的集合平均预报对 U、T、Z 的预报效果均优于控制预报。ETKF 方法的预报改进程度较 BGM 方法更大,且对 U 和 T 预报技巧的优势尤为明显。

同时,两种集合预报系统对 U、T 和 Z 都表现为,在高层的离散程度好于低层,低层 U 和 T 的离散度较小,Z 的离散度较大,但采用 BGM 方法的集合预报系统的离散度小于采用 ETKF 方法。综上,ETKF 方法较 BGM 方法能更好地表现出大气的真实状态。

4　台风路径预报结果分析

4.1　台风实况与路径预报结果

1209 号台风“苏拉”于 7 月 28 日 00 时在菲律宾马尼拉以东 630 km 处(126.8°E,14.4°N)的西北太平洋洋面上生成,生成之后开始向北偏西方向移动,强度不断增强,于 30 日 06 时加强为台风,8 月 1 日 14 时进一步发展为强台风。8 月 1 日 19 时 15 分前后,“苏拉”在台湾花莲市秀林乡沿岸首次登陆,登陆时中心附近最大风力达到 14 级(42 m/s)。登陆后的“苏拉”很快减弱,沿台湾东部北上,于 2 日 07 时又转向西北方向移动,并于当日 22 时 50 分前后在福建省福鼎市秦屿镇沿海第二次登陆。台风登陆后向偏西方向移动,继续深入福建,3 日 02 时降为热带风暴,最终穿过福建北部在江西境内减弱。

根据控制预报、BGM 方法集合平均及各个集合成员 48 h 路径预报(图 4a)可以看到,BGM 扰动成员预报路径之间保持了一定的离散度,但集合成员未能将实况路径包含其中,多数成员的预报路径位于实况路径以南。BGM 集合平均预报尽管改善了控制预报在福建沿海二次登陆后移速过快的问题,但对登陆位置改进不明显,集合平均对台风初始位置的预报略优于控制预报。

由控制预报、ETKF 方法集合平均及各个集合成员 48 h 路径预报(图 4b),各集合成员预报路径之间保持了相当的离散度,集合成员路径的可能范围将实况及控制预报的路径都包含在内,但与 BGM 方法集合成员类似的是,大部分成员预报路径较实

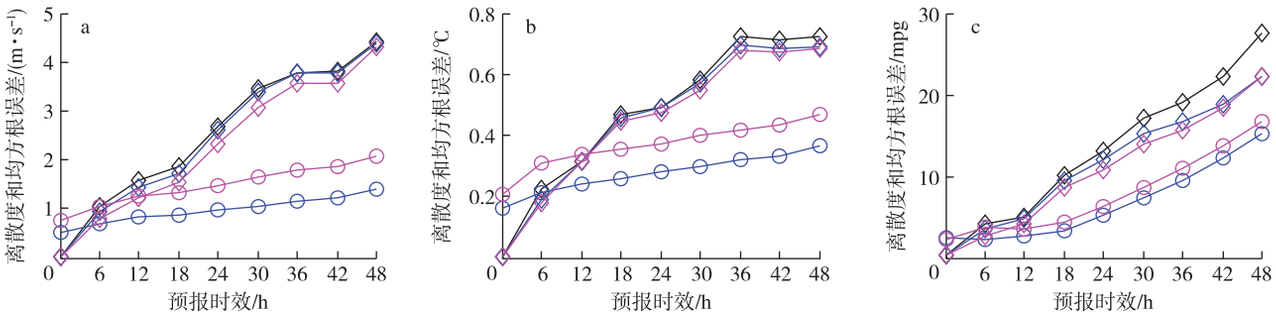

图 3 基于 BGM 与 ETKF 初始扰动方法的集合平均预报对 850 hPa 上 U(a)、T(b)和 Z(c)的离散度和均方根误差随预报时效的变化(菱形标记:均方根误差;圆形标记:离散度;黑色实线:控制预报;蓝色实线:基于 BGM 扰动的集合平均预报;红色实线:基于 ETKF 扰动的集合平均预报)

Fig.3 Ensemble spread and RMSE variations of (a) U, (b) T and (c) Z at 850 hPa with the forecast lead time by ensemble forecasts based on the initial perturbation methods of BGM and ETKF (RMSEs are marked with diamond-shape, while the ensemble spreads are marked with circular-shape. The black lines refer to the control forecasts, while the ensemble mean forecasts based on BGM and ETKF are marked with blue and red lines, respectively)

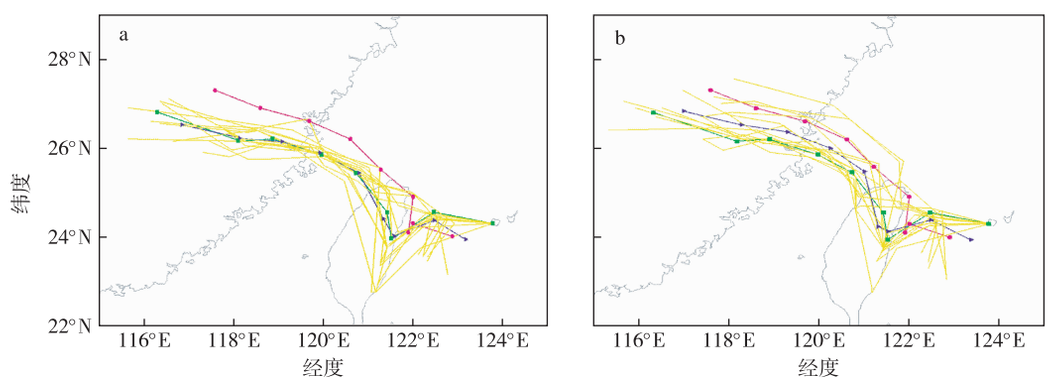

图 4 台风“苏拉”(1209)的路径实况与基于 BGM(a)和 ETKF(b)初始扰动方法的 48 h 路径集合预报(红线:JTWC 实况路径;绿线:控制预报;蓝线:集合平均预报;黄线:14 个集合成员的预报)

Fig.4 The observed track of Typhoon Saola (1209) and the track ensemble forecasts of 48 h lead time based on the initial perturbation methods of (a) BGM and (b) ETKF (The JTWC observations, the control forecast and the ensemble mean forecasts are marked with red, green and blue lines, respectively, while the yellow lines refer to predictions of 14 ensemble members)

况路径偏南。对于路径预报,ETKF 集合平均较控制预报和 BGM 方法集合预报都更接近实况,集合平均预报的台风起始位置也更接近实况位置,在台风移出台湾后,集合平均预报的路径要明显好于控制预报。从控制预报与 ETKF 集合平均预报结果都可以看到“苏拉”台风在台湾北部的一个向南转折过程,在台湾东北部的首次登陆地点两者较接近。在台湾登陆后,控制预报与集合平均预报路径相对于实况均偏南,但集合平均预报的路径要明显好于控制预报与 BGM 集合预报,集合平均预报的第二次登陆位置也明显更优,更接近 JTWC 实况。

4.2 台风路径预报结果对比

从图 5 可以看到,BGM 集合平均对台风初始位置的预报结果相对于控制预报的改进十分明显,误差减小了 52%。控制预报在 24、36、48 h 的路径预报误差分别为 64、102、152 km,而集合平均预报在 24、36、48 h 的路径预报误差分别为 56、86、120 km,BGM 集合平均相对于控制预报,误差分别减小了 15、10、21%。

ETKF 集合平均路径预报的误差除 06 和 18 h 时效预报外均明显小于控制预报和 BGM 集合平均预报误差,且 24 h 时效后,ETKF 集合平均的改进效果显著。对于台风初始位置的预报,ETKF 集合平均较 BGM 集合平均比控制预报有更为明显的改进,误差相比于控制预报减小了 72%。ETKF 集合平均预报在 24、36、48 h 的路径预报误差分别为 33、56、85 km,集合平均的误差相对控制预报分别减小了 48、46、44%,对控制预报的改进程度较 BGM 集

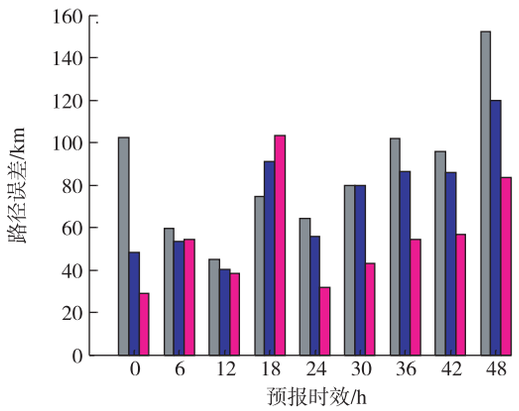

图 5　控制预报与基于 BGM 和 ETKF 初始扰动方法的集合平均路径预报的误差随预报时效的变化(灰色柱:控制预报;蓝色柱:基于 BGM 扰动的集合平均预报;红色柱:基于 ETKF 扰动的集合平均预报)

Fig. 5　The track prediction error variations with the forecast lead time by the ensemble forecasts in the control forecast and those based on the initial perturbation methods of BGM and ETKF(The gray columns refer to the control forecasts, while the ensemble forecasts based on BGM and ETKF are marked with blue and red columns, respectively)

合平均更优。

总体而言,基于 BGM 和 ETKF 两种初始扰动方法的集合平均预报均明显改善了台风“苏拉”的路径预报,但相较之下,采用 BGM 方法的集合平均预报效果不如采用 ETKF 的集合平均预报。随着预报时效的延长,ETKF 方法较 BGM 方法的优势更加明显。

5　结论与讨论

本文分别采用了 BGM 与 ETKF 方法作为初始扰动方案,建立了基于 WRF 模式的集合预报系统,进行了台风“苏拉”的路径集合预报试验,对纬向风场(U)、温度场(T)和位势高度场(Z)的预报效果进行检验,并对台风的路径预报效果进行对比分析,得到如下几点结论:

1)基于 BGM 初始扰动方案的 WRF 模式台风集合预报系统,只能在最快增长模方向上保持集合预报误差方差。ETKF 方法克服了 BGM 方法中分析误差方差固定不变及其扰动难以保持正交性的不足。

2)低层 U、T 和 Z 的离散度均优于高层,其中 U 和 T 的离散度略有不足,Z 的离散度较大,在一定程度上能够表现大气的真实状态。另一方面,BGM 方法所得到的集合成员离散度小于 ETKF 方法,对大气真实状态的表征能力不及后者。采用 BGM 或者 ETKF 初始扰动方法的集合平均预报对 U、T、Z 的预报效果均优于控制预报。ETKF 方法的预报改进程度较 BGM 方法更大,且对 U 和 T 预报技巧的优势尤为明显。

3)基于两种扰动方法的集合平均都明显改善了台风“苏拉”的路径预报,尤其是控制预报在福建沿海第二次登陆后移速过快的问题,但对台风登陆位置并无明显改进。同时,采用 ETKF 方法的集合平均预报对台风“苏拉”路径的改进效果优于采用 BGM 方法的集合平均预报。

本文主要考察 ETKF 与 BGM 两种集合预报初始扰动方法对 1209 号台风“苏拉”路径预报的改进效果,因此在模式积分的初始场上未加 Bogus,也未对气旋初始位置进行调整。在构建集合预报系统时,本文仅考虑了初始场不确定性,并未考虑模式不确定性,并且不同物理参数化方案组合、模式分辨率、集合成员个数等对台风路径集合预报的影响还有待进一步研究。

参考文献(References):

Bishop C H, Etherton B J, Majumdar S J. 2001. Adaptive sampling with the ensemble transform Kalman filter. Part I: Theoretical aspects[J]. Mon Wea Rev, 129(3): 420-436.

Buizza R, Palmer T N. 1995. The singular-vector structure of the atmospheric global circulation[J]. J Atmos Sci, 52(9): 1434-1456.

陈静,陈德辉,颜宏. 2002. 集合数值预报发展与研究进展[J]. 应用气象学报, 13(4): 497-507. Chen Jing, Chen Dehui, Yan Hong. 2002. A brief review on the development of ensemble prediction system[J]. J Appl Meteor Sci, 13(4): 497-507. (in Chinese).

段明铿,王盘兴. 2004. 集合预报方法研究及应用进展综述[J]. 南京气象学院学报, 27(2): 279-288. Duan Mingkeng, Wang Panxing. 2004. Advances in researches and applications of ensemble prediction [J]. J Nanjing Inst Meteor, 27(2): 279-288. (in Chinese).

段明铿,王盘兴,李驰钦. 2012. NCEP 集合预报系统在亚欧和北美区域的预报效果对比[J]. 大气科学学报, 35(6): 641-651. Duan Mingkeng, Wang Panxing, Li Chiqin. 2012. Comparisons on forecast performance of NCEP ensemble prediction system between Eurasia and North America regions[J]. Trans Atmos Sci, 35(6): 641-651. (in Chinese).

Epstein E S. 1969. Stochastic dynamic prediction[J]. Tellus, 21(6): 739-759.

关吉平,张立凤. 2006. 基于增长模繁殖法的集合预报试验[J]. 气象科学, 26(3): 272-278. Guan Jiping, Zhang Lifeng. 2006. Ensemble forecasting experiments based on the BGM method [J]. Scientia Meteor Sinica, 26(3): 272-278. (in Chinese).

关吉平,黄泓,张立凤. 2003. 集合预报中初始扰动生成方法的探讨[J]. 解放军理工大学学报:自然科学版, 4(2): 87-90. Guan Jiping, Huang Hong, Zhang Lifeng. 2003. Methods of producing initial perturbations in ensemble forecast[J]. Journal of PLA University of Science and Technology, 4(2): 87-90. (in Chinese).

He C F, Zhi X F, You Q L, et al. 2015. Multi-model ensemble forecasts of

tropical cyclones in2010 and 2011 based on the Kalman filter method [J]. Meteor Atmos Phys, 127(4): 467-479.

Leith C E. 1974. Theoretical skill of Monte Carlo forecasts[J]. Mon Wea Rev, 102(6): 409-418.

Lorenz E N. 1963a. Deterministic nonperiodic flow[J]. J Atmos Sci, 20(2): 130-141.

Lorenz E N. 1963b. The mechanics of vacillation[J]. J Atmos Sci, 20(5): 448-465.

Lorenz E N. 1963c. The predictability of hydro-dynamic flow[J]. Transactions of the New York Academy of Sciences, 2(25): 409-432.

Lorenz E N. 1965. A study of the predictability of a 28-variable atmospheric model[J]. Tellus, 17(3): 321-333.

Lorenz E N. 1995. The essence of chaos[M]. Washington: University of Washington Press.

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[J]. 气象学报, 66(4): 526-536. Ma Xulin, Xue Jishan, Lu Weisong. 2008. Preliminary study on ensemble transform Kalman filter-based initial perturbation scheme in GRAPES global ensemble prediction[J]. Acta Meteor Sinica, 66(4): 526-536. (in Chinese).

Ma X L, Xue J S, Lu W S. 2009. Study on ETKF-based initial perturbation scheme for GRAPES global ensemble prediction[J]. J Meteor Res, 23(5): 562-574.

马旭林, 于月明, 姜胜, 等. 2014. 基于集合卡尔曼变换的目标观测敏感区识别系统优化及影响试验[J]. 大气科学学报, 37(6): 749-757. Ma Xulin, Yu Yueming, Jiang Sheng, et al. 2014. Optimization and influence experiment to identify sensitive areas for target observations on ETKF method[J]. Trans Atmos Sci, 37(6): 749-757. (in Chinese).

滕华超, 杨军, 刘端阳, 等. 2014. 基于 WRF 和一维雾模式的能见度集合预报的个例研究[J]. 大气科学学报, 37(1): 99-107. Teng Huachao, Yang Jun, Liu Duanyang, et al. 2014. Ensemble forecast of visibility based on WRF and one-dimensional fog model: A case study [J]. Trans Atmos Sci, 37(1): 99-107. (in Chinese).

孙晶. 2014. 基于 ETKF 初始扰动方案的台风路径和强度集合预报试验研究[D]. 南京: 南京信息工程大学. Sun Jing. 2014. Ensemble forecasting of TC track and intensity based on ETKF initial perturbation scheme[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science and Technology. (in Chinese).

孙照渤, 谭桂容, 赵振国, 等. 2013. 中国东部夏季雨型的人工神经网络集合预测[J]. 大气科学学报, 36(1): 1-6. Sun Zhaobo, Tan Guirong, Zhao Zhenguo, et al. 2013. Ensemble prediction of summer rainfall patterns over eastern China based on artificial neural networks [J]. Trans Atmos Sci, 36(1): 1-6. (in Chinese).

Talagrand O, Vautard R, Strauss B. 1997. Evaluation of probabilistic prediction systems[C]//Proceedings ECMWF Workshop on Predictability: 1-25.

Toth Z. 1991. Estimation of atmospheric predictability by circulation analogs[J]. Mon Wea Rev, 119(1): 65-72.

Toth Z, Kalnay E. 1993. Ensemble forecasting at NMC: The generation of perturbations[J]. Bull Amer Meteor Soc, 74(12): 2317-2330.

Toth Z, Kalnay E. 1997. Ensemble forecasting at NCEP and the breeding method[J]. Mon Wea Rev, 125(12): 3297-3319.

Toth Z, Zhu Y, Marchok T. 2001. The use of ensembles to identify forecasts with small and large uncertainty [J]. Wea Forecasting, 16(4): 463-477.

Wang X G, Bishop C H. 2003. A comparison of breeding and ensemble transform Kalman filter ensemble forecast schemes[J]. J Atmos Sci, 60(9): 1140-1158.

Wei M, Toth Z, Wobus R, et al. 2006. Ensemble transform Kalman filter-based ensemble perturbations in an operational global prediction system at NCEP[J]. Tellus A, 58(1): 28-44.

于永锋, 张立凤. 2005. 基于增长模繁殖法的集合预报初始扰动饱和分析[J]. 大气科学, 29(6): 955-964. Yu Yongfeng, Zhang Lifeng. 2005. A study of initial perturbation saturation in ensemble prediction based on the "Breeding of Growing Modes" method[J]. Chinese J Atmos Sci, 29(6): 955-964. (in Chinese).

张涵斌, 陈静, 智协飞, 等. 2014a. GRAPES 区域集合预报系统应用研究[J]. 气象, 40(9): 1076-1087. Zhang Hanbin, Chen Jing, Zhi Xiefei, et al. 2014a. Study on the application of GRAPES regional ensemble prediction system[J]. Meteor Mon, 40(9): 1076-1087. (in Chinese).

张涵斌, 陈静, 智协飞, 等. 2014b. 基于 GRAPES_Meso 的集合预报扰动方案设计与比较[J]. 大气科学学报, 37(3): 276-284. Zhang Hanbin, Chen Jing, Zhi Xiefei, et al. 2014b. Design and comparison of perturbation schemes for GRAPES_Meso based ensemble forecast [J]. Trans Atmos Sci, 37(3): 276-284. (in Chinese).

Zhang H B, Chen J, Zhi X F, et al. 2015a. A comparison of ETKF and downscaling in a regional ensemble prediction system [J]. Atmosphere, 6(3): 341-360.

Zhang H B, Chen J, Zhi X F, et al. 2015b. Study on multi-scale blending initial condition perturbations for a regional ensemble prediction system [J]. Adv Atmos Sci, 32(8): 1143-1155.

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, 38(5): 633-640. (in Chinese).

Zhi X F, Zhou W Y, Xu Z. 2011. Multi-model Ensemble Forecasts of the TC Tracks over the Western Pacific Using the TIGGE Dataset[C]// The 3rd International Conference on Information Science and Engineering. Yangzhou, China. 4173-4176.

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, 32(5): 492-499. (in Chinese).

朱春子, 李清泉, 王兰宁, 等. 2013. 基于 T106L26 全球大气环流模式的夏季集合预报[J]. 大气科学学报, 36(2): 192-201. Zhu Chunzi, Li Qingquan, Wang Lanning, et al. 2013. An ensemble forecast for summer with a global atmospheric general circulation model T106L26[J]. Trans Atmos Sci, 36(2): 192-201. (in Chinese).

(责任编辑: 孙宁)