

基于模式约束三维变分技术的连续循环同化试验研究^{*1}

梁旭东¹ 王 斌²

LIANG Xudong¹ WANG Bin²

1. 中国气象局上海台风研究所, 中国气象局台风预报技术重点开放实验室, 上海, 200030

2. LASG, 中国科学院大气物理研究所, 北京, 100029

1. *Laboratory of Typhoon Forecast Technique, Shanghai Typhoon Institute, CMA, Shanghai 200030, China*

2. *LASG, Institute of Atmospheric Physics, CAS, Beijing 100029, China*

2007-01-31 收稿, 2007-04-06 改回.

Liang Xudong, Wang Bin. 2010. Data assimilation cycle experiments in typhoon numerical prediction using the model-constrained 3DVar. *Acta Meteorologica Sinica*, 68(2):153-161

Abstract As a typical initial- and boundary-value problem, data assimilation technique plays a very important role in numerical weather prediction (NWP). In the past decades, the 3D- and 4D-Var data assimilation techniques were improved quickly not only in the theoretical researches but also in the NWP of operational centers. However, there are still some problems which limit the wide use of variational data assimilation techniques. One of them is that the general 3-dimensional variational data assimilation (3DVar) technique is short of complicated constraints such as the dynamics and physics in a numerical model, as are used in the 4-dimensional variational data assimilation (4DVar) technique. The other one is that using a numerical model and its adjoint with the 4DVar technique requires a large amount of computer resources, and thus limits its practical applicability. A new 3DVar method (model-constrained 3DVar, MC-3DVar) is then proposed by incorporating a numerical model constraint. This method minimizes the distance between the observations and model variables and also their time tendency, so that the optimized initial conditions not only fit the observations but also satisfy the constraints of full dynamics and physics of the numerical model. In this study, an assimilation cycle is employed to improve the initial conditions using various data at different time. A case study of Typhoon Saomai (2006) from 20:00 BST 8 to 05:00 BST 9 August is carried out. The assimilated data include the cloud drift wind, QuikSCAT sea level wind, and Bogus sea level pressure. The track forecast of Saomai is improved dramatically after assimilating these data. The simulated structure of the typhoon is also improved using the new initial conditions after the assimilation cycle. These can be attributed to that using MC-3DVar method, after the Bogus sea level pressure field is assimilated, the height, wind and other variables are also adjusted by the constraints of the dynamics and physics of the numerical model. In addition to the Bogus vortex data, the other assimilated observations are also important to improve the initial conditions.

Key words Variational data assimilation, Model constraint, Typhoon

摘 要 由于模式约束三维变分同化技术中考虑了模式的动力和物理过程, 因此能保证各物理量间的平衡关系, 从而滤除由于观测资料引入导致的高频波动, 减小模式与初始场的协调时间。由于能在较短时间调整到稳定状态, 采用模式约束三维变分同化进行连续循环同化可用较少的计算量达到同化多时次的多种观测资料的目的。该研究利用模式约束三维变分技术, 针对 2006 年“桑美”台风个例, 进行了连续循环同化卫星云导风、QuikSCAT 海面风、Bogus 海平面气压的试验。在台风数值

* 资助课题: 国家科技部社会公益专项(2005DIB3J104), 国家科技支撑计划课题“灾害天气精细数值预报系统及短期气候集合预测研究”及中国气象局新技术推广项目。

作者简介: 梁旭东, 主要从事数值预报、资料同化、台风研究。Email: liangxd@mail.typhoon.gov.cn

预报中往往需要使用经验构造的台风信息(如 Bogus 海平面气压, Bogus 风场等),该研究采用了模式约束三维变分同化技术同化 Bogus 海平面气压。由于模式约束三维变分同化技术充分考虑了各物理量间的约束,因此通过同化 Bogus 海平面气压也调整了初始场中相应的高度场、温度场、风场等变量,使得初始场中的台风涡旋具有较强的协调性,提高了对台风的模拟能力。采用 AVN 模式 6 小时间隔的分析场作为侧边界,2006 年 8 月 8 日 20 时的分析场作为初估场,文中对 8 月 8 日 20 时到 9 日 05 时“桑美”台风的观测资料进行了连续循环同化。采用连续循环同化后台风路径的模拟精度得到了显著提高,对台风降水结构等的模拟也得到了改善。

关键词 变分同化, 模式约束, 台风

中图法分类号 P458.1⁺24

1 引言

变分同化技术是现在发展较为完善的同化技术之一,其中四维变分同化技术(4DVar)自 1997 年 12 月开始在欧洲中期天气预报中心业务化应用,并取得了明显效果(Rabier, et al, 2000),法国气象局、英国气象局以及日本气象厅等也先后进行了业务化应用。4DVar 技术自提出以来(丑纪范,1971;Lewis, et al,1985; Le Dimet, et al,1986; Talagrand, et al, 1987)经过长足的发展,实现了采用带有物理过程的数值模式及其伴随模式,以及在非静力模式及云模式中的应用研究。但是,4DVar 在应用中需要较大的计算量,目前在实际应用中,三维变分技术(3DVar)(Parrish, et al, 1992; Courtier, et al, 1998; Zhang, et al, 2002; 张华等, 2004; 庄世宇等, 2005; 朱江等, 2007)也得到了快速的发展和广泛的应用。

由于 3DVar 的约束条件比 4DVar 的约束条件简单,特别是在 3DVar 中没有时间积分,因此在求解过程中需要的计算量远比 4DVar 小。然而,由于在 3DVar 中物理和动力约束条件比较简单,不能保证同化结果中同一变量在不同空间点的平衡,以及不同变量间的动力和物理平衡(例如在台风系统中的非地转平衡)。由于 4DVar 能同化不同时刻的资料,采用较复杂的物理和动力约束,相对能得到更优的分析结果。因此如果在 3DVar 中能采用复杂的动力和物理约束,则可以利用有限的计算资源得到较优的分析结果。

近年来,一些研究通过采用增加弱约束条件的方法来降低分析变量间的非平衡性,其基本假定是认为模式变量间的非平衡性往往会激发高频的波动(如重力波),而这些高频波动的振幅远大于实际大气中相应频率波动的振幅。相关的研究可以分为数值滤波方法(DFI: Digital-filter Initialization)(Gustafsson,1992; Gauthier, et al, 2001; PolaV-

arapu, et al,2000)和物理约束法(Sun, et al, 2001; Gao, et al, 1999; Brausseau, 1991, Brausseau, et al,1991; Ishikawa, et al,2001)。

在实际大气中,不同的变量具有不同的谱分布,因此 DFI 方法仅能滤除较短的波动,但是不能保证各变量间的平衡,而且对于截断频率的选择也没有物理依据。Liang 等(2007a)通过引入数值模式作为弱约束条件,提出了模式约束三维变分同化技术(Model constrained 3DVar, 简称为 MC-3DVar)。MC-3DVar 能采用与解 4DVar 相同的方法来求解,只是在 MC-3DVar 中数值模式仅用于计算时间倾向而不在同化窗口内进行长时间的积分。

Liang 等(2007a)基于浅水波模式建立了 MC-3DVar 系统。试验结果表明在包含模式约束后,即使使用对角背景误差协方差阵也可使观测信息在各变量间和空间上得到传播,同时 Liang 等(2007b)基于 MM5 4DVar 系统建立了 MC-3DVar 系统。采用 MC-3DVar 系统,对 2002 年的 11 个台风的 23 个时次进行了同化 AMSU-A 反演温度的试验,对于 0214 号台风“黄蜂”(Vongfong)个例进行了同时同化 AMSU-A 反演温度、QuikSCAT 海面风及卫星云导风的试验。研究表明,采用 MC-3DVar 技术,通过同化卫星资料能显著减小路径预报误差。

MC-3DVar 技术只在三维空间进行同化,因此不能同时进行不同时刻的多种资料的同化,但由于在 MC-3DVar 技术中采用模式约束充分考虑了各物理量间的约束,能滤除高频波动,可以减小模式 spin-up 时间,因此采用 MC-3DVar 进行连续循环同化可用较少的计算量达到同化多时次的多种观测资料的目的。

由于海上观测资料的缺乏,在台风数值预报中往往需要使用经验构造的台风信息(如 Bogus 海平面气压, Bogus 风场等)。这些方案不仅能修正模式初始场中不正确的台风位置,而且能在初始场中激

发出类似台风的涡旋结构。但是这些经验构造的信息并不能保证与模式场的协调。解决这种不协调性通常有两种方法,一是采用模式积分调整,美国的 Navy Fleet Weather Center 通过将不含平均流的 Rankin 涡在热带平均探空曲线情况下,将海表温度设为 301 K 积分到一个恒定态后,将 1600 km 范围内的风、温度、湿度、高度和海平面气压作为 Bogus 涡旋;另一种方法是采用 BDA 方法(Zou, et al, 1999; Xiao, et al, 2000a; Pu, et al, 2002; Zhang, et al, 2003),在 BDA 技术中,用四维变分同化技术对模式场进行调整以期得到协调的台风涡旋结构。

采用基于四维变分同化技术的 BDA 技术在同化窗口较长时需要大量的计算资源。该研究将采用 MC-3DVar 技术,在同一时刻进行 Bogus 台风信息和观测资料同化。由于使用有限的计算资源即能完成调整,因此采用 MC-3DVar 连续循环同化可以在观测资料的约束下改善台风涡旋结构,从而改善台

风数值预报结果。

在 Liang 等(2007a)中对比分析了 MC-3DVar 技术和 3DVar 的性能,研究表明,MC-3DVar 技术能得到较通常 3DVar 技术更协调的分析场。本研究针对 2006 年“桑美”进行连续循环同化试验,通过同化不同时刻的卫星云导风、QuikSCAT 海面风、Bogus 海平面气压来检验采用 MC-3DVar 技术同化不同时刻多种资料改善模式初试场的能力。

2 台风个例及使用的资料

2006 年 6 号台风“桑美”(Saomai)于 8 月 5 日 20 时(北京时,下同)生成于(11.9°N,146.4°E)的洋面上,“桑美”结构紧密,外围云带较弱,在 8 日 23 时以后经历了迅速加强过程,于 9 日 18 时达到超强台风级别(图 1),并于 10 日 15 时 20 分左右登陆,登陆时中心最低气压 920 hPa,近中心最大风速 60 m/s,此后迅速进入福建沙埕并造成重大灾害。

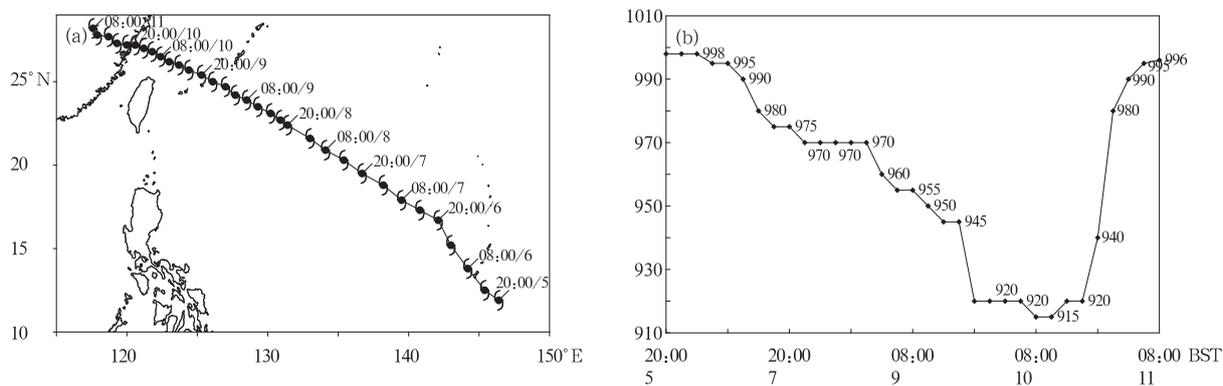


图 1 2006 年 8 月 5 日 20 时—11 日 08 时“桑美”的路径(a)和中心海平面气压(b,单位:hPa)

Fig. 1 Track (a) and central sea level pressure (b) of “Saomai”

at 20:00 BST 5—08:00 BST 11 August 2006 (unit: hPa)

8 日 20 时到 9 日 05 时(北京时,下同)共进行 2 次卫星云导风观测(许健民等,1997;方翔等,2000),分别在 8 日 19 时和 9 日 02 时(图略)。在这期间有 2 次有效的 QuikSCAT 海面风观测(观测到大部分的台风风场),分别是 8 日 18 时和 9 日 05 时(图略)。该研究的 QuikSCAT 资料从 Remote Sensing Systems2 的网页下载。

3 模式参数设置与连续循环同化试验

研究采用模式格点数为 151×151 ,垂直方向 21 层,水平格距 27 km,同化系统中物理选项包括

Blackadar 高分辨率边界层参数化方案, Grell 积云参数化方案,大尺度层云降水方案。同化结果进行向前预报时模式中的物理选项包括 Burk-Thompson 边界层参数化方案, Dudhia 简单冰相显式降水方案,干对流调整和 Betts-Miller 积云参数化方案。背景场采用 Aviation Model(AVN)模式的分析场,水平分辨率 $1^\circ \times 1^\circ$ 。

试验中采用的连续循环同化流程图(图 2),同化中首先采用 8 月 8 日 20 时的 AVN 模式分析场同化 Bogus 海平面气压(构造方法见 Liang, et al, 2007b)、卫星云导风和 QuikSCAT 海平面风,然后

将同化结果积分到 9 日 02 时,将预报场作为背景场,再次同化 Bogus 海平面气压和卫星云导风,积

分到 9 日 05 时再同化 Bogus 海平面气压和 QuikSCAT 海面风。

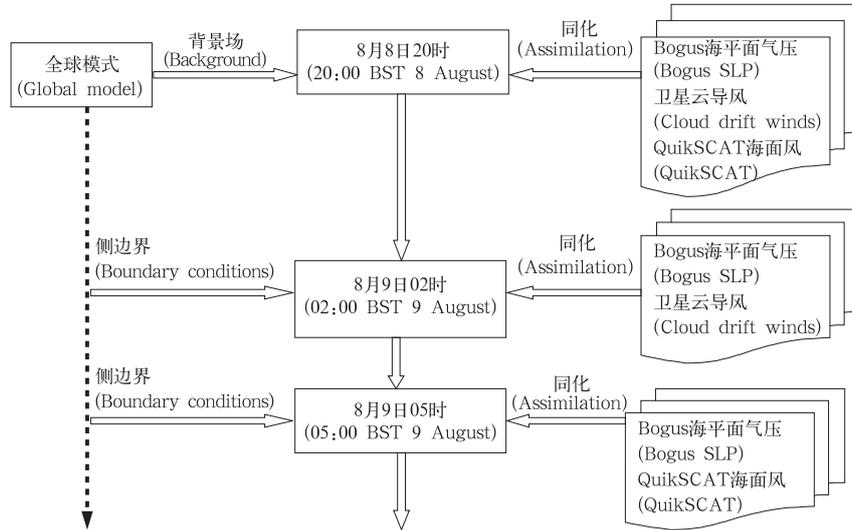


图 2 同化试验流程

Fig. 2 Flow chart of the assimilation cycle

在采用 2006 年 8 月 8 日 20 时的 AVN 模式分析场插值得到初始场并以 6 h 间隔的 AVN 模式预报结果作为侧边界进行 48 h 预报的对比预报中,台风中心强度较弱,中心闭合等压线为 1000 hPa,而且中心位置有明显偏差,48 h 路径预报中,前 24 h 的预报路径偏北,36 小时后路径偏南(图略),这主要表现为比较弱的台风环流的非对称摆动。

为提高台风初始位置的定位精度,同时增加初

始场中台风强度,按照 Liang 等(2007b)采用的技术,构造 Bogus 海平面气压同化到模式中,通过 MC-3DVar 调整,在同化海平面气压场的同时,模式中其他的变量也得到了调整。通过台风中心的的东西向垂直剖面上可以看出(图 3a),同化海平面气压后,各等压面上的高度都得到了调整,在台风中心区域高度场被降低,台风得到了加强。同样,台风风场也得到了调整(图 3b),在 900—700 hPa 等压面上,

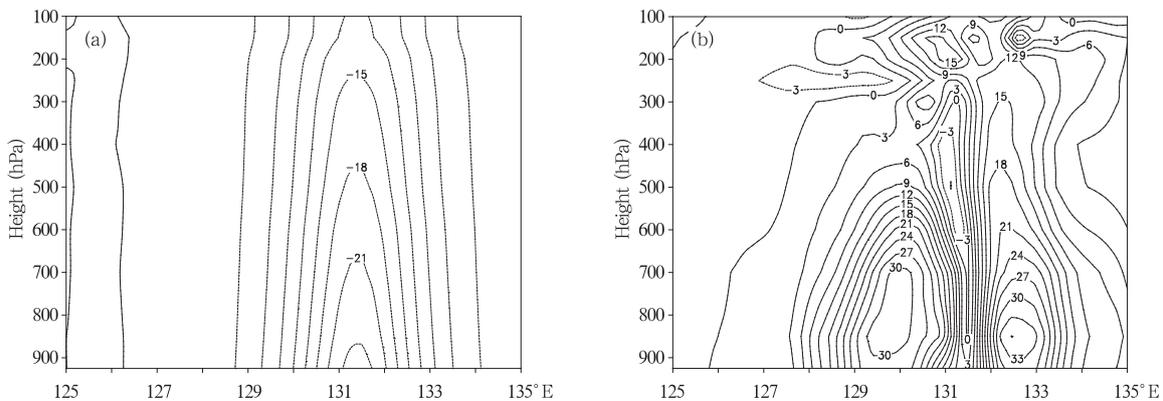


图 3 同化海平面气压后,穿过台风中心的的东西向垂直剖面上各等压面的高度和风速增量
(a. 高度增量,单位:dagpm;b. 风速增量,单位:m/s)

Fig. 3 West-east vertical cross sections through the typhoon center for the increments in (a) the height (unit: dagpm) and (b) wind speed (unit: m/s)

有 30 m/s 以上的风速增幅区。同时,风速的增量表现出非对称的结构,在台风西侧风速增量层次比东侧深厚,而台风东侧在 900—800 hPa 有更大的风速增量。“桑美”台风东侧是副热带高压,具有较大的气压梯度,因此也有更高的风速(图略)。“桑美”台风在这期间中心气压从 970 hPa 发展到 920 hPa。

在对比试验(图 4)和同化试验(图 5)的结果中可以看出,在未同化 Bogus 海平面气压时,台风在预报的海平面气压场中结构松散,强度较弱,初始时刻中心气压仅为 1000 hPa,积分 48 h 后在 996 hPa 左右。而在同化 Bogus 海平面气压以后(图 5),不仅初始场中的台风中心气压明显降低,而且预报结果

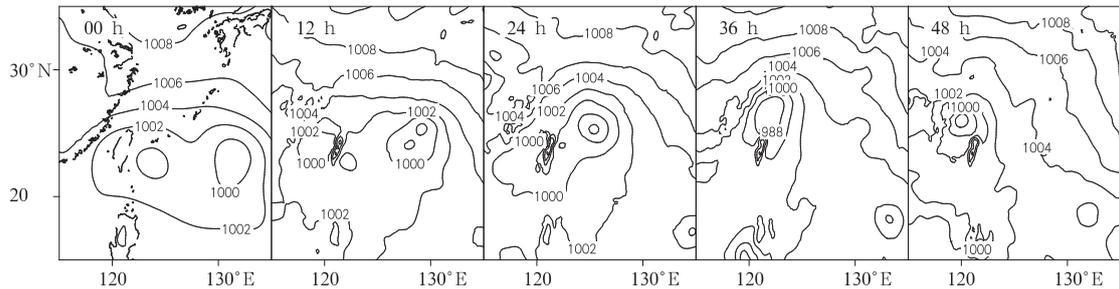


图 4 对比试验初始场和预报结果中的海平面气压(单位:hPa)

Fig. 4 The initial and forecasted 12–48 h sea level pressure fields in the control run (unit: hPa)

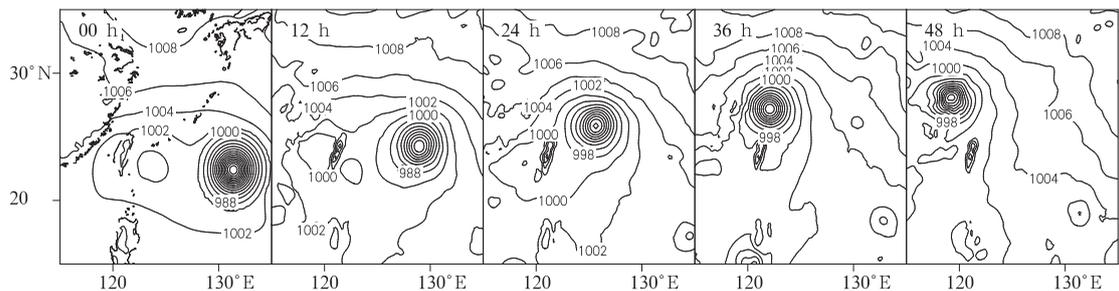


图 5 同化 Bogus 海平面气压后的初始场和预报结果中的海平面气压(单位:hPa)

Fig. 5 As in Fig. 4 but for the comparative run with the Bogus sea level pressure field assimilated

中台风不仅结构紧密而且强度明显增强。

由于初始场中台风位置和结构得到改善,对台风移动方向(登陆地点)的预报得到了改善,但是移动速度的预报偏快(图 6a)。

在同化 Bogus 海平面气压的同时,增加同化 QuikSCAT 海面风,对台风移向的预报误差继续得到减小(图 6a)。但是从图(6a)中也可看出,尽管台风移动方向预报得到了改善,但是对台风移动速度的预报误差依然比较大。

将 8 日 20 时的同化结果积分 6 h 后(9 日 02 时),有卫星云导风资料可以使用,同时为改善台风定位,进行了 Bogus 海平面气压和卫星云导风的同化。在同化 Bogus 海平面气压及卫星云导风后,对台风路径移动速度的预报误差得到减小,但是对于台风移动方向的预报误差依然明显(图 6b)。

将 9 日 02 时同化结果积分 3 h 得到 9 日 05 时的预报结果,此时有 QuikSCAT 海平面风资料可以使用。为调整台风初始位置,首先进行了同化 Bogus 海平面气压的试验。在同化 Bogus 海平面气压后,台风路径的 12、24、36 和 48 h 路径预报距离误差分别为 30.8、42.3、76.6 和 134.9 km,得到了显著改善(图 6c,图 7)。在同化 9 日 05 时的 QuikSCAT 海平面风资料和 Bogus 海平面气压后,尽管路径距离误差较只同化 Bogus 海平面气压时增大了,但是对台风的移动方向以及台风登陆位置的预报较只同化 Bogus 海平面气压更准确(图 6c,图 7)。

图 7 中可看出,随着不断增加同化的资料,12 h 的预报误差逐渐减小,在以后的预报中(8 日 20 时,9 日 02 时),尽管对台风移动的方向预报得到改善,但是移动速度的预报误差较大(图 6a、6b),因此路

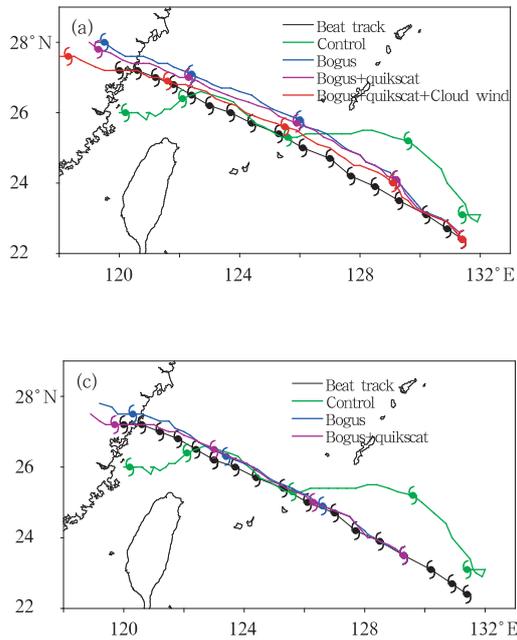


图6 不同时刻同化不同观测资料的台风路径预报 (台风符号间隔 3 h, 预报路径中每个台风符号间隔 12 h。
a. 初始时刻 8 日 20 时, 预报时间 8 日 20 时—10 日 20 时;
b. 初始时刻 9 日 02 时, 预报时间 9 日 02 时—10 日 20 时;
c. 初始时刻 9 日 05 时, 预报时间 9 日 05 时—10 日 20 时)

Fig. 6 Tracks of the typhoon in the various experiments (The time interval of the typhoon symbols on the Best track and forecast track is 3 hours and 12 hours, respectively. (a): for the initial time 20:00 BST 8, forecast times 20:00 BST 8—20:00 BST 10; (b): for the initial time 02:00 BST 9, forecast times 02:00 BST 9—20:00 BST 10, and (c): for the initial time 05:00 BST 9, forecast times 05:00 BST 9—20:00 BST 10)

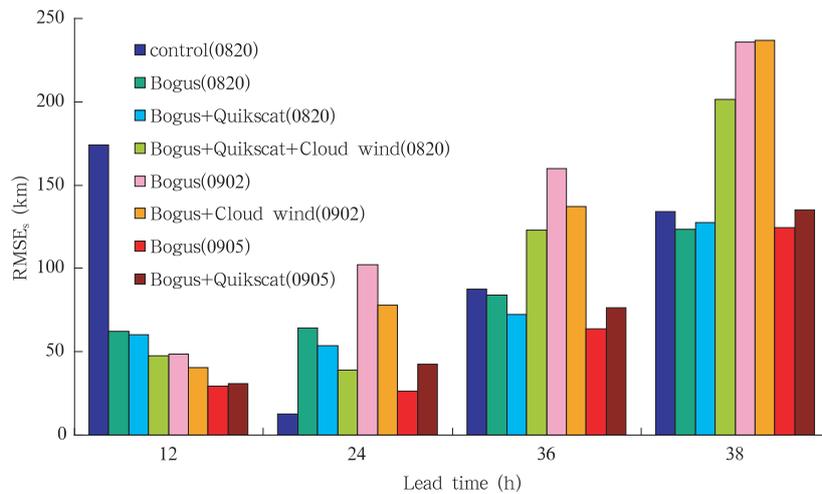


图7 不同时刻同化不同观测资料的台风路径预报均方误差(单位: km)
(图例中为同化的资料和初始时间(月、日))

Fig. 7 The track forecast RMS-errors in the experiments for the different lead time and with different data assimilated. (unit: km and the legend is for the assimilated data with the date of format DDHH, where DD is the day and HH is the hour)

径误差较大,但当更多的观测资料同化后(9日05时),明显减小了路径预报误差。由于从8日20时同化后再积分到9日02时,将积分结果作为背景场进行同化,而且使用的侧边界条件也没有改变,然后积分到9日05时,同样将积分结果作为背景场进行同化,因此对于预报结果的改善都来自于新的观测资料的引入。

应当指出的是,在9日02时进行再次同化并进行预报时,其预报时效相对于8日20时已经延长了6h,也即9日02时的12h预报相当于8日20时的18h预报。同理,9日05时的12h预报相当于8日20时的21h预报。在图7中相同预报实效(如8日20时和9日02时的12h预报)的预报误差即使相同,对于连续循环同化后的预报来说也已经延长了

预报时效,也即对前一次的初始场进行了改进。因此图7中的预报误差表明,连续循环同化后对初始场的改进是明显的,这也可从图6中看出。

MC-3DVar 连续循环同化可以同化不同时刻的观测资料,但由于区域模式的预报误差不仅来自初始场,同时还来自于侧边界条件以及模式误差,而由于连续循环同化并没有改变侧边界条件,因此在区域模式中长时间的连续循环同化并不利于提高预报能力。试验中采用 MC-3DVar 同化 9 h 内的观测资料,而且同化间隔的选取也主要根据能获得的观测资料确定,试验结果表明 MC-3DVar 连续循环同化具有同化多个时刻观测资料的能力,而对于循环同化时间的长度和循环时间间隔的选取还依赖于观测资料和进一步的研究。

尽管有一些非常规观测资料(如卫星云导风, QuikSCAT 海平面气压等)提供台风信息,但是这些资料依然不足以提供整个台风结构信息。从以上的同化结果中可以看出,同化 Bogus 台风(这里为海平面气压)对于改善台风的初始位置及提高台风

预报精度有明显的效果(图6、图7),但是由于 Bogus 台风的结构与实际台风的结构毕竟有显著差异(比如台风非对称的结构),在将 Bogus 台风结构同化到模式中后,由于通过模式动力和物理过程的调整,在模式场与 Bogus 台风结构协调的过程中,台风的环境场在一定程度上被破坏,而其他观测资料的使用能在一定程度上进一步改善对台风结构及环境场的描述,从而提高对台风的预报能力。

采用经过连续循环同化得到的初始场大大减小了对“桑美”的登陆点的预报误差(图6c、图7),同时也改善了对台风结构的模拟。在台风登陆前后,数值模式模拟出两个雨带(图8a),一条位于台风中心的北侧,在浙江中部,一条位于台风外围,在上海北部($31^{\circ}\text{N}, 121^{\circ}\text{E}$ 附近)。尽管模拟的雨带分布较实况观测雨带宽,外围雨带略偏东,但是从观测的降水分布(图8b)中也可以看出两个明显的雨区分布(与观测相比,模拟的降水量偏小)。而从 925 hPa 风场上看,台风中心的北侧有超过 40 m/s 的“向岸”风,在台风中心南侧的“离岸”风小于 30 m/s。

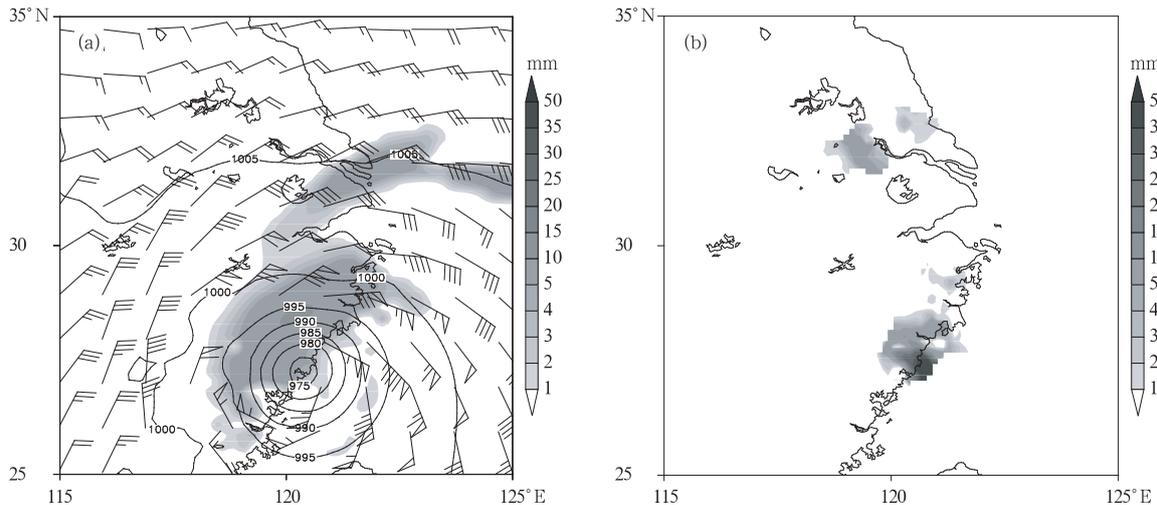


图8 “桑美”台风登陆时(10日下午17时)1 h降水分布
(a. 采用9日05时连续循环同化得到初始场模拟结果,阴影为1 h降水量分布,风羽为925 hPa的风场,等值线为海平面气压场;b. 自动站观测)

Fig. 8 1 hour precipitation of “Saomai” at landfall (17:00 BST 10 August 2006)
(a) The simulated forecast of the 1 h precipitation (shaded), wind at 925 hPa (barb), and sea level pressure (contour) using the assimilated initial conditions at 05:00 BST 9 August.
(b) The observed 1 hour precipitation from the automatic weather stations)

“桑美”台风尽管强度较强,但是结构非常紧凑,从卫星云图上看,“桑美”台风的降水范围很小(图9)。而从模拟结果看,“桑美”台风降水范围较小,主

要是受两条干空气带的影响。在模拟结果(图10)中,925—600 hPa 的累积比湿有两条低值带:如图中蓝色箭头,一条是从 $35^{\circ}\text{N}, 120^{\circ}\text{E}$ 以东到 30°N ,

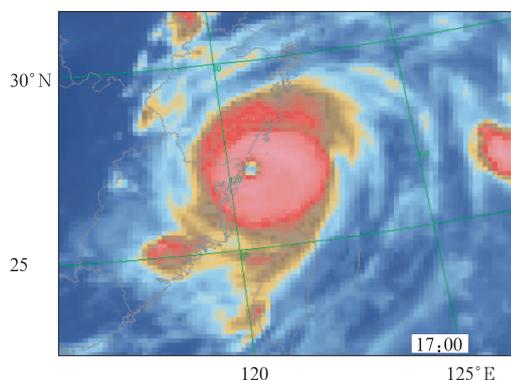


图9 FY-2C卫星观测到的“桑美”
台风的红外云图(10日17时)

Fig. 9 The FY-2C observed infra-red satellite
image of “Saomai” at 17:00 BST 10 August 2006

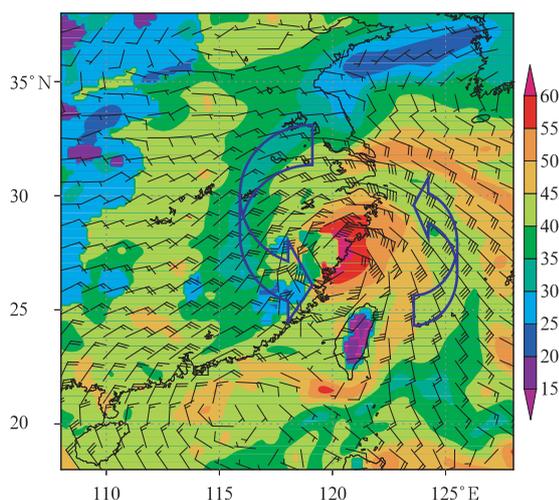


图10 模拟结果中台风登陆时从925—600hPa的
累积比湿(阴影,单位:kg/kg)和平均风场(风羽)

Fig. 10 The simulated accumulative specific moisture
(Shaded, Unit: kg/kg) and averaged wind (barb)
between 925 and 600 hPa at “Saomai” landfall

115°E,再到25°N,117°E附近逐渐进入台风中心区域的北方干空气,这也是台风的南侧降水较少的一个原因;另一条是从南海—菲律宾北部—东海的南方干空气。南边的干空气尽管没有直接侵入台风的中心区域,但是隔断了台风的外围水汽供应,使得台风的外围云系不强盛,表现出一个结构紧凑的台风。这也是尽管台风登陆强度较强,但是降水影响范围较小的一个原因。

4 结论和讨论

MC-3DVar 只在三维空间求解,需要的计算资

源较少,但同时考虑了模式中动力和物理过程作为约束条件,可以调整出与模式场较为协调的台风初始场,因此减小了模式与初始场协调的时间。采用MC-3DVar能更有效地连续循环同化不同时次的观测资料。本研究针对台风个例进行了连续循环同化多种资料的试验。

因海上观测资料的缺乏,在台风数值预报中往往需要使用经验构造的台风信息(如Bogus海平面气压,Bogus风场等)。MC-3DVar技术充分考虑了各物理量间的约束,因此也具有通过同化Bogus台风构造协调性较强的台风初始场的能力。本研究针对2006年“桑美”台风的试验表明,在同化Bogus海平面气压后,由于同化技术中动力和物理过程的约束,初始场中的高度场、温度场、风场也得到了调整,从而改善了模拟结果。

通过对8月8日20时到9日05时的卫星云导风、QuikSCAT海面风、Bogus海平面气压的连续循环同化,模式的初始场得到了不断的改进,对台风路径的预报能力得到不断的提高,同时对台风的降水分布的预报也得到了改善。模拟结果表明,由于外围干空气的侵入,是“桑美”台风结构较为紧密的一个原因。

由于区域模式的预报误差同时还来自侧边界条件和模式误差,因而长时间间隔的连续循环同化对于提高模式的预报能力是有限的,因此对于连续循环同化时间间隔的选取还需要进一步研究。

尽管通过连续循环同化提高了对“桑美”台风的路径和风雨影响的模拟能力,但是由于模式使用的水平分辨率较低,使用的观测资料的水平分辨率也较低,因此对于进一步提高对登陆台风的模拟能力依然是有限的。为提高对登陆台风的模拟能力,有必要使用更高时空分辨率的观测资料(如多普勒雷达资料),用更高的水平分辨率进行同化试验研究。

参考文献

- 丑纪范. 1971. 天气数值预报中使用过去资料的问题. 中国科学, 6: 635-644
- 方翔, 许健民. 2000. 张其松. 高密度云导风资料所揭示的发展和不断发展热带气旋的对流层上部环流特征. 热带气象学报, 16(3): 218-224
- 许健民, 张其松, 方翔. 1977. 用红外和水汽两个通道的卫星测值指定云迹风的高度. 气象学报, 55(4): 408-417
- 张华, 薛继善, 庄世宇等. 2004. GRAPeS三维变分同化系统的理想试

- 验. 气象学报, 62(1):31-41
- 朱江, 周广庆, 闫长香等. 2007. 一个三维变分海洋资料同化系统的设计和初步应用. 中国科学 D 辑, 37(2):261-271
- 庄世宇, 薛继善, 朱国富等. 2005. GRAPeS 全球三维变分同化系统基本设计方案与理想试验. 大气科学, 29(6):872-884
- Brousseau P, Haus J. 1991. Application of a three-dimensional Variational inverse model to the analysis of ecohydrodynamic data in the Bering and Chukchi Seas. *J Mar Syst*, 1:383-401
- Brousseau P. 1991. A Variational inverse method for the reconstruction of general circulation field in the northern Bering Sea. *J Geophys Res*, 96:4891-2907
- Courtier P, Anderson E, Heckley W. 1998. The ECMWF implementation of three-dimensional Variational assimilation (3D-Var). I: Formulation, *Quart J Roy Meteor Soc*, 124:1783-1807
- Dimet Le, X E, Talagrand O. 1986. Variational algorithms for analysis and assimilation of meteorological observations: Theoretical aspects. *Tellus*, 38A: 97-110
- Gao J, Xue M, Shapiro A, et al. 1999. A Variational method for the analysis of three-dimensional wind fields from two Doppler radars. *Mon Wea Rev*, 127: 2128-2142
- Gauthier G, Thepaut J-N. 2001. Impact of the digital filter as a weak constraint in the preoperational 4DVar assimilation system of Meteo-France. *Mon Wea Rev*, 129:2089-2102
- Gustafsson N. 1992. Use of a digital filter as weak constraint in Variational data assimilation. *Proc. Workshop on Variational Assimilation with Special Emphasis on Three-dimensional Aspects*, Reading, United Kingdom, European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, 327-338
- Ishikawa Y, Awaji T, Komori N. Dynamical initialization for the numerical forecasting of ocean surface circulations using a Variational assimilation system. *J Phys Oceanogr*, 2001, 31:75-93
- Kyungjeen Park, Zou X. 2004. Toward developing an objective 4DVar BDA scheme for hurricane initialization based on TPC observed parameters. *Mon Wea Rev*, 132: 2054-2069
- Lewis J M, Derber J C. 1985. The use of adjoint equations to solve a Variational adjustment problem with adjective constraints. *Tellus*, 37A:309-322
- Liang Xudong, Wang B, Chan CL, et al. 2007a. Tropical cyclone forecasting with model-constrained 3D-Var. I: Description. *Quart J Roy Meteor Soc*, 133: 147-153
- Liang Xudong, Wang B, Chan J C L, et al. 2007b. Tropical cyclone forecasting with a model-constrained 3D-Var, Part II: Improved cyclone track forecasting using AMSU-A, QuikSCAT and cloud-drift wind data. *Quart J Roy Meteor Soc*, 133: 155-165
- Lynch P, Huang X Y. 1992. Initialization of the HIRLAM model using a digital filter. *Mon Wea Rev*, 120:1019-1034
- Parrish D F, Derber J C. 1992. The National Meteorological Center's spectral statistical-interpolation analysis system. *Quart J Roy Meteor Soc*, 120:1747-1763
- PolaVarapu S, Tanguay M, Fillion L. 2000. Four-dimensional variational data assimilation with digital filter initialization. *Mon Wea Rev*, 128:2491-2510
- Pu Z-X, Tao W-K, Braun S J, et al. The impact of TRMM data on mesoscale numerical simulation of supertyphoon Paka. *Mon Wea Rev*, 2002, 130:2448-2458
- Rabier F, Jaarvinen H, Klinker E, et al. 2000. The ECMWF operational implementation of 4D variational assimilation Part I: experimental results with simple physics. *Quart J Roy Meteor Soc*, 126: 1143-1170
- Sun J, Crook N A. 2001. Real-time low-level wind and temperature analysis using single WSR-88D data. *Wea Foreca*, 16:117-132
- Talagrand O, Courtier P. 1987. Variational assimilation of meteorological observations with the adjoint vorticity equation. Part I: Theory. *Quart J Roy Meteor Soc*, 113: 1313-1330
- Xiao Q, Zou X, Wang B. 2000a. Initialization and simulation of a landfalling hurricane using a variational bogus data assimilation scheme. *Mon Wea Rev*, 128: 2252-2269
- Zhang X-Y, Wang B, Ji Z. 2003. Initialization and simulation of a typhoon using 4-Dimensional variational data assimilation-research on typhoon Herb (1996). *Adv Atmos Sci*, 20:612-622
- Zhang X, Wang B, Ji Z Z, et al. 2002. Three-dimensional variational data assimilation implemented in numerical modeling for Wuhan torrential rain in July 1998. *Progress Natural Sci*, 12(6):445-448
- Zou X, Xiao Qingnong. 1999. Studies on the initialization and simulation of a mature hurricane using a variational bogus data assimilation scheme. *J Atmo Sci*, 57: 836-860