

数字滤波弱约束四维变分同化在台风初始化中的应用 I. 个例试验*

钟剑^{1)2)†} 费建芳³⁾ 程小平³⁾ 孙一妹¹⁾ 施威¹⁾

1)(中国卫星海上测控部, 江阴 214431)

2)(中国卫星海上测控部飞行器海上测量与控制联合实验室, 江阴 214431)

3)(中国人民解放军理工大学气象海洋学院, 南京 211101)

(2013年11月25日收到; 2014年1月26日收到修改稿)

传统四维变分(4D-Var)同化台风初始化中, bogus资料的同化将不可避免引起初始时刻风场和质量场之间的非平衡, 在预报时段产生高频振荡噪音, 进而影响数值模拟效果. 如何有效滤除 bogus 资料引入产生的高频噪音非常重要. 本文为第I部分, 基于数字滤波弱约束4D-Var方法, 开展台风初始化个例试验研究. 2010年Chaba台风两个不同时刻数值试验结果表明: bogus资料4D-Var同化台风初始化中, 呈现出与暴雨个例明显不同的3 h地面气压倾向特征, 不同数字滤波权重试验在初始时刻差异小, 在预报1—4 h差异明显; 实施数字滤波弱约束使得初始时刻700 hPa垂直速度场和850 hPa散度场在台风区域减小, bogus资料为引起高频噪音的一个重要因素; 数字滤波权重选择是影响台风同化和数值模拟效果的重要因素, 合理的数字滤波权重选择试验可明显改善台风路径和强度预报, 相对于台风强度预报, 路径预报改善更加明显; 同时, 某些个例中, 数字滤波权重的选择决定着台风数值模拟的成功与否. 不同台风个例相对最佳数字滤波权重并不相同, 如何选择数字滤波权重非常重要. 第II部分中将针对bogus资料同化台风初始化, 提出一种数字滤波权重优选方案.

关键词: 数字滤波弱约束, 4D-Var, 台风初始化

PACS: 92.60.Wc

DOI: 10.7498/aps.63.119203

1 引言

数值预报过程中, 初始场中质量场和风场之间的非平衡性将会在积分阶段产生虚假的高频振荡噪音, 引发spin-up现象, 进而影响数值模拟效果, 甚至可能造成数值模拟失败. 目前, 数值预报初始场通常采用变分同化方法构造^[1-4], 其实施过程中观测资料的引入, 模式误差的存在等均会引起初始场的非平衡. 为了有效削弱变分同化初始场中的非平衡性, 气象工作者们相继提出了许多方法^[5], 目前应用广泛的为数字滤波方法, 主要包括数字滤波初始化和结合四维变分(4D-Var)的数字滤波弱约

束同化方法.

数字滤波在气象领域中应用广泛, 最早由Lynch等^[6]和Huang等^[7]引入作为初始化方法, 研究结果表明其与非线性正规化初始化方法同样有效, 但实施更简单. 之后, 相关学者^[8-11]分别针对三维变分(3D-Var)同化后状态变量, 讨论分析了数字滤波初始化滤除初始场中高频噪声的有效性. De Pondeva等^[12]对4D-Var同化后状态变量实施数字滤波初始化, 表明其能有效滤除初始场中20%的噪音.

数字滤波在4D-Var中应用更有效方式是作为弱约束形式, 包括应用于状态变量完全模态和增量两种方式. 状态变量完全模态数字滤波弱约束主

* 国家自然科学基金(批准号: 41105065, 41230421, 41005029, 41175025) 和国家公益性行业专项(批准号: GYHY201106004)资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: zhj_zhongjian@163.com

要基于MM5同化系统实施. Peng等^[13]利用MM5同化系统, 针对飏线个例, 研究表明数字滤波弱约束可有效滤除高频振荡噪声; 同时, 针对定量降雨预报, 对传统数字滤波进行改进, 以便有效保留中尺度重力波^[14,15]. Wee等^[16]针对台风个例开展观测系统模拟理想实验, 结果表明, 数字滤波弱约束4D-Var不仅能削弱同化过程中由于观测资料的引入、上边界条件的难以确定和模式积分过程中模式误差存在等所产生的动力非平衡, 同时能改善初始分析场和预报场质量. Gauthier等^[17]研究表明, 将数字滤波弱约束应用于状态变量增量相对应应用于状态变量完全模态能获得更加平衡的初始场.

Gauthier等^[17]利用法国预业务4D-Var同化系统开展增量形式数字滤波弱约束试验, 研究表明其在保证分析场足够逼近观测资料的同时能有效滤除高频振荡. Huang等^[1]和张卫民等^[18]分别在WRF 4D-Var同化系统和全球谱模式约束的YH4DVAR同化系统中对数字滤波弱约束进行了试验. 王舒畅等^[19]在预业务化的4D-Var同化系统中, 针对数字滤波弱约束开展了南方雨雪天气个例数值试验, 验证了其滤除高频振荡噪声的有效性.

Wee等^[16]研究表明, 观测资料的引入将会在4D-Var中引起初始场非平衡, 进而产生高频振荡噪声. 在4D-Var同化台风初始化中, 往往需要同化bogus资料改善台风强度和路径预报^[2,4], bogus资料构造依赖于各种假设条件, 其与模式动力初始场并不一定完全协调, bogus资料在同化系统中的引入不可避免的将引起初始状态变量场的非平衡, 产生高频振荡噪声而影响台风路径和强度预报.

目前, 增量形式数字滤波弱约束4D-Var的应用研究虽然开展较多, 但针对bogus资料同化台风初始化应用研究开展较少. 数字滤波弱约束4D-Var应用于bogus资料同化台风初始化, 包括: 高频噪声特性分析、数字滤波弱约束滤除高频噪声的有效性及其对台风路径和强度预报的影响、和数字滤波弱约束权重的选择等系列问题都有待进一步研究, 以便详细了解数字滤波弱约束4D-Var对bogus资料同化台风初始化的影响.

2 数字滤波弱约束4D-Var理论

传统4D-Var代价函数中通常仅包括观测项 J_0 和背景场项 J_b , 其代价函数增量形式为^[3]

$$J = J_0 + J_b$$

$$= \frac{1}{2} \sum_{i=0}^N \langle R_i^{-1} (\bar{H}_i \bar{M}_i \delta x_0 - d_i), (\bar{H}_i \bar{M}_i \delta x_0 - d_i) \rangle + \frac{1}{2} \langle \delta x_0, \delta x_0 \rangle, \quad (1)$$

其中, $\delta x_0 = x - x^b$ 为分析增量, x^b 为背景场, R 表示观测误差协方差, H 和 \bar{H} 分别表示观测算子和观测算子切线性模式, M 和 \bar{M} 分别表示状态变量预报方程组和预报方程组切线性模式, N 表示同化窗区长度, $d_i = y_i^o - H_i(M_i(x^b))$ 为观测信息增量, y^o 表示观测资料.

数字滤波弱约束4D-Var代价函数中增加了数字滤波惩罚项 J_c , 考虑同化窗区中间时刻为滤波时刻, 此时惩罚项 J_c 增量形式为

$$J_c = \frac{1}{2} \nu_{df} \langle \delta x(t_{N/2}) - \delta x^{DF}(t_{N/2}), \delta x(t_{N/2}) - \delta x^{DF}(t_{N/2}) \rangle, \quad (2)$$

其中, ν_{df} 为惩罚项系数, 用以设置数字滤波弱约束项的约束程度, 从某种意义上来说, 其等价于反问题研究中的正则化参数^[20-23]; $\delta x(t_{N/2})$ 表示滤波时刻的状态变量增量; $\delta x^{DF}(t_{N/2})$ 表示滤波后的状态变量增量, 其计算表达式为

$$\delta x^{DF}(t_{N/2}) = \sum_{k=0}^N \alpha_k \delta x(t_k), \quad (3)$$

其中, α_k 为权重系数, 用以滤除由于滤波区间从无限到有限截断所产生的Gibbs振荡, 其定义为

$$\alpha_k = h_{-k} W_k, \quad (4)$$

其中, h_{-k} 为状态变量时间序列傅里叶变换系数; W_k 表示窗口函数, 目前常采用Dolph-Chebyshev(Dolph)窗口^[24],

$$W_k = \frac{1}{2M+1} \left[1 + 2r \times \sum_{m=0}^M T_{2M} \left(x_0 \cos \frac{\theta_m}{2} \right) \cos m\theta_k \right], \quad (5)$$

其中, T_{2M} 为 $2M$ 阶Dolph-Chebyshev多项式,

$$x_0 = \tau_s / \cos(\pi \Delta t),$$

$$r = 1 / \cosh(2M \cosh^{-1} x_0)$$

(\cosh 表示双曲余弦), $\theta_k = 2k\pi/M$. τ_s 的最佳值为 $\tau_s = M\Delta t$, 更大的 τ_s 值不能充分滤去Gibbs振荡, 而较小的 τ_s 值又将阻尼低频波.

利用模式状态变量非线性和切线性模式, 增量形式数字滤波弱约束项可表示为

$$J_c = \frac{1}{2} \left[L(t_0, t_{N/2}) \delta x_0 - \sum_{k=0}^N \alpha_k L(t_0, t_k) \delta x_0 \right]^T$$

$$\begin{aligned} & \times \left[L(t_0, t_{N/2}) \delta x_0 - \sum_{k=0}^N \alpha_k L(t_0, t_k) \delta x_0 \right] \\ & = \frac{1}{2} \left[\sum_{k=0}^N \gamma_k L(t_0, t_k) \delta x_0 \right]^T \\ & \times \left[\sum_{k=0}^N \gamma_k L(t_0, t_k) \delta x_0 \right], \end{aligned} \quad (6)$$

其中,

$$L(t_0, t_k) = \bar{M}_k = \bar{M}_{t_{k-1}, t_k} \bar{M}_{t_{k-2}, t_{k-1}} \cdots \bar{M}_{t_1, t_2} \bar{M}_{t_0, t_1},$$

\bar{M}_{t_{j-1}, t_j} 表示从 t_{j-1} 时刻到 t_j 时刻的切线性模式积分;

$$\gamma_k = \begin{cases} -\alpha_k, & k \neq N/2, \\ 1 - \alpha_k, & k = N/2. \end{cases}$$

增量形式数字滤波弱约束项关于初始状态变量增量的梯度为

$$\begin{aligned} & \nabla_{\delta x_0} J_c \\ & = \sum_{k=0}^N \gamma_k L^*(t_0, t_k) b_{N/2} \\ & = \sum_{k=0}^N \left[\gamma_k L^*(t_0, t_k) \left(\sum_{k=0}^N \gamma_k L(t_0, t_k) \delta x_0 \right) \right], \end{aligned} \quad (7)$$

其中, $L^*(t_0, t_k)$ 表示 $L(t_0, t_k)$ 相对应的伴随模式; $b_{N/2} = \delta x(t_{N/2}) - \delta x^{DF}(t_{N/2})$. (7) 中显示, 其梯度计算仅包括数值模式的切线性和伴随模式积分, 在传统 4D-Var 代价函数观测项求梯度时已有计算, 因此, 数字滤波弱约束项的实施相对于传统 4D-Var 并不会增加额外计算量.

3 数值试验

3.1 个例选择和试验设计

本文以 2010 年 Chaba 台风两个不同初始时刻同化试验为例进行研究. 数值试验采用两重网格嵌套方案, 区域中心为 (27.5°N, 127.5°E), 水平分辨率为 45 km 和 15 km, 水平格点数为 70 × 90 和 160 × 214, 垂直方向为 28 层. 同化试验仅在粗网格区域实施, 同化窗区均为 6 h, 同化时段分别为 10 月 25 日 06—12 时 (Chaba 10-25-06 台风) 和 10 月 27 日 00—06 时 (Chaba 10-27-00 台风); 预报试验在粗细网格同时进行, 细网格区域初始条件由粗网格同化结果插值得到, 并进行 72 h 预报. 同

化试验均基于 WRFDA3.3.1 版本、预报试验均基于 WRF3.3.1 版本实施. 由于 4D-Var 中需要用到切线性和伴随模式, 而 WRFDA3.3.1 中仅提供了表面拖曳边界层方案, 一个对流参数化方案和大尺度浓缩微物理参数化方案 (WRFDA3.3.1 中将上述参数化方案选择均设置为 98) 三个物理参数化方案的切线性和伴随模式代码 [25], 本文在同化试验中采用上述三种物理方案进行试验; 预报试验中采用物理方案分别为 YSU 边界层方案、Kain-Fritsch 对流参数化方案和 WSM-6 微物理参数化方案. 同化试验的背景场误差协方差采用美国国家环境预报中心 (NCEP) 提供的 cv3.

对于每个台风个例, 均设计 6 组对比试验. 其中, 控制试验将 NCEP 再分析资料作为初始场 (NCEP); 对比试验一将传统 4D-Var 同化试验结果作为初始场 (dfi 0); 对比试验二、三、四、五分别将不同数字滤波权重的弱约束 4D-Var 同化试验结果作为初始场, 权重设置分别为 10(df10), 100(df100), 1000(df1000) 和 2000(df2000). 其中, 同化试验中同化常规观测资料和构造的 bogus 资料. bogus 资料的构造方法具体见文献 [4]. bogus 资料构造时需提供台风中心位置和最大风速 (由中国台风年鉴资料提供) 及最大风速半径 (本文中最大风速半径均设置为 80 km).

3.2 Chaba 10-27-00 台风初始化

下面以 Chaba 台风 10 月 27 日 00 时台风为例, 讨论分析不同数字滤波权重弱约束 4D-Var 同化时, 高频噪声特性及对同化初始场、台风路径和强度预报的影响.

3.2.1 噪声分析

通常采用平均绝对地面气压倾向来表示数值模式中的噪声水平分布和平衡状况 [6], 其总体倾向诊断量 N 定义为

$$N = \frac{1}{IJ} \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \left| \frac{\partial p_s}{\partial t} \right|_{ij}, \quad (8)$$

其中, I, J 分别表示 x 和 y 方向格点数, p_s 表示格点地面气压, N 表示平均绝对地面气压倾向. 通常采用 3 h 平均绝对地面气压倾向进行研究.

图 1 表示 NCEP 和不同数字滤波权重 4D-Var 试验中, 台风中心 800 km 半径范围内平均绝对地面气压倾向随时间演变. 图中显示, NCEP 试验 N 数值最小且基本保持不变 (数值在 1.0 左右), 这主

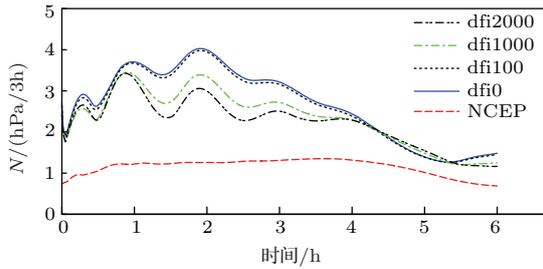


图1 (网刊彩色) 台风中心 800 km 半径范围内平均绝对地面气压倾向随时间演变

要是由于NCEP 试验初始场平衡性更好, 高频噪音强度很小的缘故. 对于本次台风个例, 数字滤波权重设置较小(df100) 试验, 与不进行数字滤波约束试验(df0) 3 h 平均地面气压倾向大小基本相同, 可见雨雪天气个例中有效数字滤波权重100 试验^[19] 对台风区域高频噪音的滤除效果并不明显; 同时, 随着数字滤波权重的增大, 高频噪音的滤除越来越明显. 必须注意到, 不同数字滤波权重试验, N 在初始时刻差异相对较小, 在数值模拟第1—4 h 差别最明显, 呈现出与暴雨个例明显不同的噪声特

性^[19]; 同时, 这也在一定程度上表明, 传统4D-Var 同化台风初始化方法就能在一定程度上削弱高频噪音, 初始时刻高频噪音强度相对于台风本身特性所引起的3 h 地面气压倾向强度较小, 但实施数字滤波约束非常重要, 其通过对初始时刻高频噪音进行有效滤除可有效抑制预报初始时段(6 h 范围内) 高频噪音的发展.

3.2.2 同化初始场分析

图2 表示 Chaba 10-27-00 台风个例 dfi0 试验和 dfi1000 试验, 初始时刻 700 hPa 垂直速度场及 850 hPa 散度场. 图中显示, 总体而言, dfi1000 试验与 dfi0 试验初始时刻 850 hPa 散度场和 700 hPa 垂直速度场分布形式基本相同, 仅在数值上有所差异. dfi1000 和 dfi0 试验垂直速度和散度差异场(图2(e) 和(f)) 显示, 不同数字滤波权重试验垂直速度和散度差异均位于台风区域, 这在一定程度上说明, bogus 资料4D-Var 同化台风初始化中, 初始场非平衡主要位于台风区域, bogus 资料的引入是台风初始化中初始时刻非平衡引起的一个重要因素.

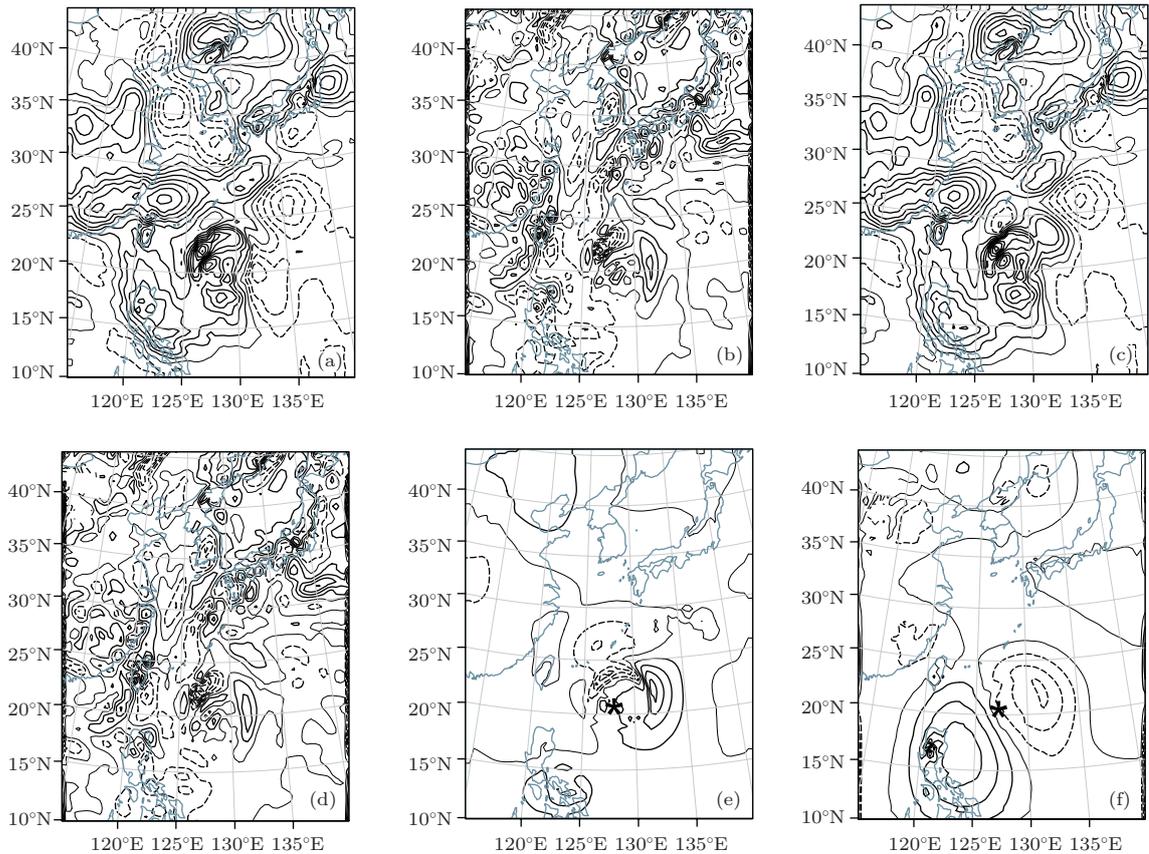


图2 Chaba 10-27-00 台风个例, 初始时刻 700 hPa 垂直速度场 ((a), (c), (e)) 和 850 hPa 散度场 ((b), (d), (f)) 分布, 实线表示正值, 虚线表示负值, * 表示台风中心, (a) 和 (b) 为 dfi0 试验场; (c) 和 (d) 为 dfi1000 试验场; (e) 和 (f) 为 dfi1000 试验 - dfi0 试验场, (a)、(c) 和 (e) 间隔 0.1 m/s, 黑色实线均表示零线; (b) 和 (d) 间隔 $2 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$; (f) 间隔 $5 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$

噪音存在的另一特征在于对垂直运动的影响, 对于 700 hPa 垂直速度场, 图 2(e) 差异场中黑色零值实线基本对应 (a) 和 (c) 中垂直速度场正负分界线; 同时, 零值线右侧 (正垂直速度差异值) 对应负垂直速度区, 而左侧 (负垂直速度差异值) 对应正垂直速度区, 这表明实施数字滤波弱约束将使得台风区域 700 hPa 垂直速度场减小, 可有效滤除初始高频噪声.

对于 850 hPa 散度场, 图 2(f) 差异场中黑色零值实线基本对应 (b) 和 (d) 中正负散度的分界线, 零值线右侧 (负散度差异值) 对应正散度区域, 零值线左侧 (正散度差异值) 对应负散度区域, 可见, 数字滤波弱约束试验使得 850 hPa 散度场在台风区域减小, 这与 Gauthier 等 [17] 模拟试验结果相一致.

3.2.3 路径和强度预报效果分析

图 3 表示 Chaba 10-27-00 台风个例, NCEP 试验和不同数字滤波权重 4D-Var 试验 72 h 台风路径预报误差. 图中显示, 对于所有 4D-Var 试验, 在台风预报前 36 h, 台风路径预报误差与 NCEP 试验相当; 同时, 数字滤波权重较小 (0, 10, 100) 试验, 台风路径预报误差相对数字滤波权重较大 (1000, 2000) 试验更小. 但是, 预报 36 h 后, 数字滤波权重较小 4D-Var 试验台风路径预报误差显著增大, 而数字滤波权重较大 4D-Var 试验台风路径预报误差增长很缓慢, 与 NCEP 试验相当. 这在一定程度上表明, 对于本次台风个例, 高频噪音的存在对台风路径预报影响非常显著, 合适的数字滤波权重选择非常重要, 其直接影响着同化效果的好坏和台风数值模拟成功与否.

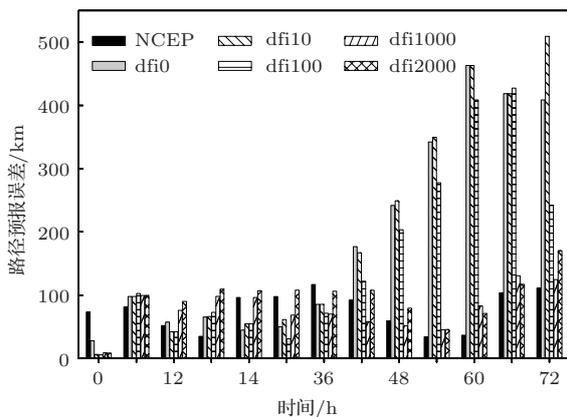


图 3 Chaba10-27-00 台风个例, NCEP 试验和不同数字滤波权重 4D-Var 试验 72 h 台风路径预报误差

图 4 和图 5 分别表示 Chaba 10-27-00 台风个

例, NCEP 试验和不同数字滤波权重 4D-Var 试验 72 h 台风中心最低水平面气压和 10 m 高最大风速预报误差. 图中显示, 相对于 NCEP 试验, 所有 4D-Var 试验在台风预报前 48 h 中心最低水平面气压预报改善明显, 对于 10 m 高最大风速改善主要位于前 24 h, 这充分说明 4D-Var 试验的有效性, 其通过同化 bogus 资料和常规观测资料可有效改善台风强度预报; 同时, 不同数字滤波权重 4D-Var 试验台风强度预报差异并不明显, 数字滤波权重较大 4D-Var 试验台风强度预报稍有改善, 这在一定程度上表明, 对于本次台风个例, 实施数字滤波权重弱约束与否及约束强度大小对台风强度预报影响相对较小.

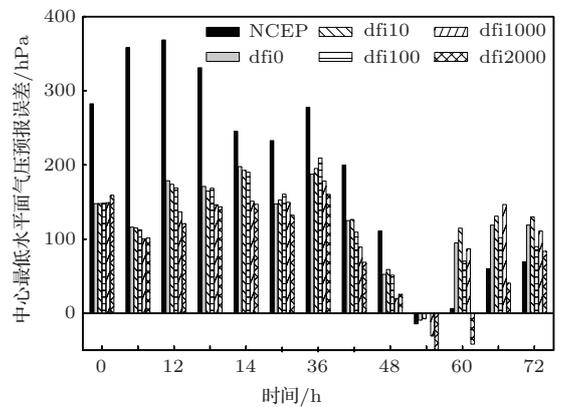


图 4 同图 3, 但表示台风中心最低水平面气压预报误差

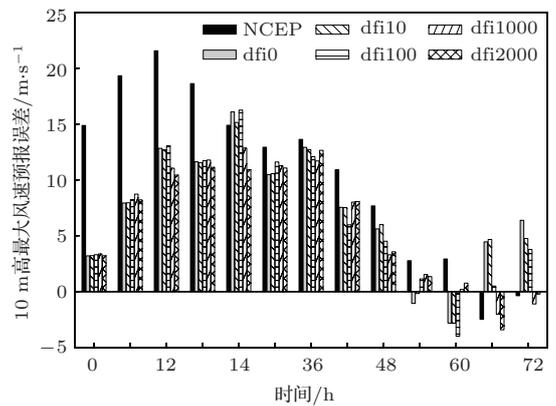


图 5 同图 3, 但表示台风 10 m 高最大风速预报误差

同时, 图 3、图 4 和图 5 显示, 对于本次台风个例, 数字滤波权重设置为 1000 时, 路径和强度预报综合相对更好, 这与业务化运行和雨雪天气过程中数字滤波权重设置 (10 和 100) [17,19] 差别明显, 业务化数字滤波权重设置并不适合于台风初始化试验.

3.3 Chaba 10-25-06 台风初始化

3.2 节中显示, 对于数字滤波弱约束 4D-Var 台风初始化试验, 并不是数字滤波权重越大, 台风路径和强度预报效果更好. 究其原因, 可能是由于过大的数字滤波权重约束, 其不仅会削弱由于观测资料和模式不协调产生的高频振荡噪声, 同时, 其还会削弱研究对象发展的内在波动特性^[15]. 本节以 Chaba 台风 10 月 25 日 06 时台风 4D-Var 同化试验为例, 进一步分析不同数字滤波权重试验对台风路径和强度预报的影响.

表 1 表示 Chaba 10-25-06 台风个例, NCEP 试

表 1 Chaba10-25-06 台风个例, NCEP 试验和不同数字滤波权重 4D-Var 试验 72 h 台风路径和强度平均预报误差

	NCEP	dfi0	dfi10	dfi100	dfi1000	dfi2000
路径误差/km	54.9	58.2	47.9	40.8	66.3	64.6
中心最低水平面气压误差/hPa	12.3	5.8	5.6	5.0	7.0	7.3
10 m 高最大风速误差/(m/s)	10.7	5.7	5.7	5.4	6.0	6.0

72 h 路径和强度误差后验统计信息显示, 对于 Chaba 10-25-06 台风个例, 100 为其相对最佳数字滤波权重, 这与 Chaba 10-27-00 台风个例相对最佳数字滤波权重为 1000 明显有所减小. 可见, 对于数字滤波弱约束 4D-Var bogus 资料同化台风初始化试验, 数字滤波权重设置并不是越大越好, 路径和强度预报误差随着数字滤波权重增大理论上应该呈现出先减小后增大趋势, 预报误差在相对最佳数字滤波权重时达到最小; 同时, 不同台风个例对应的相对最佳数字滤波权重并不一定完全相同, 这主要是由 bogus 资料的误差特性和 bogus 资料与周围环境场的相容性所决定的. bogus 资料误差较小, 与周围环境场更相容, 所引入的高频噪声强度越小, 最佳数字滤波权重相对较小; bogus 资料误差越大, 所引入的高频噪声强度越大, 最佳数字滤波权重相对较大. 同时, 这也表明数字滤波权重的选择非常重要, 在第 II 部分^[26]中将提出一种数字滤波优选方案.

4 结论和讨论

目前, 4D-Var 同化台风初始化过程中, 通常需要同化 bogus 资料以改善台风路径和强度预报. 然而, 由于 bogus 资料构造中采用诸多假设和近似条件, 其作为观测资料进入同化系统中将不可避免引

验和不同数字滤波权重 4D-Var 试验, 72 h 台风路径和强度平均预报误差. 表中显示, 对于本次台风个例, 相对于 NCEP 试验, dfi10 和 dfi00 试验明显改善了台风路径预报, 其他三组同化试验路径预报更差; 对于台风强度预报, 所有同化试验均有明显改善. 同时, 随着数字滤波权重的增大, 路径和强度预报误差均呈现出明显的先减小后增大过程, 且均在数字滤波权重设置为 100 时达到最小. 这在一定程度上表明, 数字滤波弱约束 4D-Var 台风初始化实际应用中, 某些个例中存在明显的相对更优数字滤波权重, 使得台风路径和强度预报误差在该数字滤波权重试验时最小.

起初始场非平衡, 进而产生高频振荡噪音影响数值模拟效果, 甚至会造成台风路径和强度预报失败. 因此, 如何有效削弱滤除同化系统中初始时刻高频振荡噪声非常重要. 本文基于数字滤波弱约束 4D-Var 方法, 针对 bogus 资料同化台风初始化开展应用研究, 讨论其高频噪声特性、不同数字滤波权重试验对台风同化初始场及路径和强度预报的影响. 主要结论如下:

1) bogus 资料 4D-Var 同化台风初始化中, 采用 3 h 地面气压倾向表示的高频噪音呈现出与暴雨个例明显不同的特征, 不同数字滤波权重试验的 3 h 地面气压倾向在初始时刻差异较小, 但在预报初期 (1—4 h 内) 差异明显增大. 这是由于噪音强度相对于台风本身地面气压变化强度较小的缘故, 但实施数字滤波弱约束非常重要, 通过对初始时刻变量场平衡性调整可有效抑制预报阶段高频噪音的发展.

2) bogus 资料同化台风初始化中, 相对于传统 4D-Var, 数字滤波弱约束 4D-Var 试验使得初始时刻 700 hPa 垂直速度场和 850 hPa 散度场有所减弱, 且主要在台风区域, 这从另一角度说明 bogus 资料的引入是引起同化系统中初始时刻非平衡性的一个重要因素, 实施数字滤波弱约束可有效滤除高频振荡噪声.

3) bogus 资料 4D-Var 同化台风初始化中, 实

施数字滤波弱约束非常重要, 不同数字滤波权重设置试验台风路径和强度预报差异明显, 合适的数字滤波权重试验可明显减小台风路径和强度预报误差; 同时, 不同台风个例相对最佳数字滤波权重并不相同, 某些特殊个例中, 数字滤波权重选择直接决定着台风数值模拟成功与否. 相对于台风强度预报, 不同数字滤波权重弱约束试验对台风路径预报影响更明显, 这主要是由于台风路径预报受大环境场影响明显, 而高频噪音影响大环境场更大的缘故.

理论上, 数字滤波弱约束 4D-Var 台风初始化中, 台风路径和强度预报误差随数字滤波权重的增大应呈现先减小后增大特征, 且存在最佳数字滤波权重, 使得预报误差达到最小. 本文两个台风个例数值试验结果表明, 实际应用中并不是每个个例都存在上述理论最佳数字滤波权重, 而且不同台风个例其最佳数字滤波权重也不相同. 同时, 对于某些特殊个例, 数字滤波权重的选择决定着同化效果的好坏及台风数值模拟的成败, 台风初始化中数字滤波权重的选择非常重要. 本文下一步工作就是针对 bogus 资料同化台风初始化中数字滤波权重选择进行进一步研究, 具体见第 II 部分.

参考文献

- [1] Huang X Y, Xiao Q N, Barker D M, Zhang X, Michaelakes J, Huang W, Henderson T, Bray J, Chen Y S, Ma Z Z, Dudhia J, Guo Y R, Zhang X Y, Won D J, Lin H C, Kuo Y H 2009 *Mon. Wea. Rev.* **137** 299
- [2] Yuan B, Fei J F, Wang Y F, Lu H C, Han Y Q 2010 *Journal of Tropical Meteorology* **26** 475 (in Chinese) [袁炳, 费建芳, 王云峰, 陆汉城, 韩月琪 2010 热带气象学报 **26** 475]
- [3] Zhong J, Fei J F, Huang S X, Du H D 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 149203 (in Chinese)[钟剑, 费建芳, 黄思训, 杜华栋 2012 物理学报 **61** 149203]
- [4] Zhong J, Fei J F, Cheng X P, Huang X G 2014 *Science China: Earth Sciences* (have accepted)
- [5] Wang S C 2008 *Study on Weak Constrains in Four Dimension Variational Data Assimilation* (Nanjing: PLA university of Science and Technology) pp 113–121 (in Chinese) [王舒畅 2008 四维变分同化中弱约束研究 (南京: 解放军理工大学) 第 113—121 页]
- [6] Lynch P, Huang X Y 1992 *Mon. Wea. Rev.* **120** 1019
- [7] Huang X Y, Lynch P 1993 *Mon. Wea. Rev.* **121** 589
- [8] Chen M, Huang X Y 2006 *Mon. Wea. Rev.* **134** 1222
- [9] Chen M, Huang X Y, Wang W 2012 *Acta Meteorologica Sinica* **70** 109 (in Chinese)[陈敏, Huang X Y, WANG W 2012 气象学报 **70** 109]
- [10] Wang S C, Huang S X, Zhang W M, Zhu X Q, Cao X Q, Li Y 2008 *Journal of Tropical Meteorology* **14** 1
- [11] Claude F, Ludovic A 2011 *Mon. Wea. Rev.* **139** 774
- [12] De Ponca M S F V, Zou X 2001 *Tellus* **53A** 192
- [13] Peng S Q, Zou X 2002 *Meteorol Atmos Phys* **81** 237
- [14] Peng S Q 2004 *Mesoscale data assimilation for improving quantitative precipitation forecasts* (Florida: The Florida state University college of Arts and Sciences) pp 8-30
- [15] Peng S Q, Zou X 2010 *J. Geophys. Res.* **115** D 23111
- [16] Wee T K, Kuo Y H 2004 *Mon. Wea. Rev.* **132** 543
- [17] Gauthier P, Thepaut J N 2001 *Mon. Wea. Rev.* **129** 2089
- [18] Zhang W M, Cao X Q, Song J Q 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 249202 (in Chinese) [张卫民, 曹小群, 宋君强 2012 物理学报 **61** 249202]
- [19] Wang S C, Li Y, Zhang W M, Zhao J, Cao X Q 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 099203 (in Chinese) [王舒畅, 李毅, 张卫民, 赵军, 曹小群 2011 物理学报 **60** 099203]
- [20] Zhong J, Huang S X, Du H D, Zhang L 2011 *Chin. Phys. B* **20** 034301
- [21] Zhong J, Huang S X, Fei J F, Du H D, Zhang L 2011 *Chin. Phys. B* **20** 064301
- [22] Zhang L, Huang S X, Shen C, Shi W L 2011 *Chin. Phys. B* **20** 119201
- [23] Zhang L, Huang S X, Shen C, Shi W L 2011 *Chin. Phys. B* **20** 129201
- [24] Lynch P 1997 *Mon. Wea. Rev.* **125** 655
- [25] Wang W, Cindy B, Michael D, Jimmy D, Dave G, Michael K, Kelly K, Lin H C, John M, Syed R, Zhang X 2012 *AR-W Version 3 Modeling system User's Guide* (New York: National Center for Atmospheric Research) pp148–202
- [26] Zhong J, Fei J F, Dong G, Cheng X P, Sun Y M 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** (accepted) (in Chinese) [钟剑, 费建芳, 董钢, 程小平, 孙一妹 2014 物理学报 **63**] (已接受)

Application of digital filter weak constraint four dimensional variational data assimilation on typhoon initialization I. Numerical experiments*

Zhong Jian^{1)2)†} Fei Jian-Fang³⁾ Cheng Xiao-Ping³⁾ Sun Yi-Mei¹⁾ Shi Wei¹⁾

1) (China Satellite Maritime Tracking and Control Department, Jiangyin 214431, China)

2) (Joint Laboratory of Ocean-based Flight Vehicle Measurement and Control, China Satellite Maritime Tracking and Control Department, Jiangyin 214431, China)

3) (Institute of Meteorology and Oceanography, PLA University of Science and Technology, Nanjing 211101, China)

(Received 25 November 2013; revised manuscript received 26 January 2014)

Abstract

Traditional four-dimensional variational (4D-Var) bogus data assimilation (BDA) will upset the internal dynamical balance of wind and mass fields, which will generate spurious fast oscillations in the prediction and cause the numerical simulation failure. How to effectively suppress the spurious fast oscillations is very important. In this paper (part I), the digital filter weak constraint 4D-Var is tested in BDA experiments. Initialization and simulation experiments are conducted for typhoon Chaba (2010) using this approach. Results show that the initial noise property is different for typhoon case and rainfall case, and the difference in surface pressure tendency is small in assimilation time and large at the initial stage in different digital filter weight setting BDA experiments. The vertical velocity field of 700 hPa and divergence field of 850 hPa in typhoon areas are both weakened in digital filter weak constraint 4D-Var experiments. Compared with the traditional 4D-Var experiment, the track and intensity predictions are improved obviously in digital filter weak constraint 4D-Var experiment with a proper digital filter weight setting, and the track prediction is apparently improved. Meanwhile, the optimal digital filter weight for different typhoon cases is different, and how to optimally select the digital filter weight is very important. In Part II, a digital filter weight selection method will be proposed for BDA experiment.

Keywords: digital filter weak constraint, four dimensional variational data assimilation, typhoon initialization

PACS: 92.60.Wc

DOI: 10.7498/aps.63.119203

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 41105065, 41230421, 41005029, 41175025), and the Special Scientific Research Fund of Meteorological Public Welfare Profession of China (Grant No. GYHY201106004).

† Corresponding author. E-mail: zhj_zhongjian@163.com