

资料同化中的数字滤波弱约束试验及分析*

王舒畅^{1)†} 李毅²⁾ 张卫民¹⁾ 赵军¹⁾ 曹小群¹⁾

1) (国防科学技术大学计算机学院软件研究所, 长沙 410073)

2) (解放军理工大学气象学院探测与信息工程系, 南京 211101)

(2010年7月27日收到; 2010年12月15日收到修改稿)

气象数值预报中, 由于分析过程引入初始非平衡, 从而引起虚假快波振荡, 重力波控制弱约束把资料分析过程和初始化过程结合在一起, 通过数字滤波弱约束在极小化过程中实现对分析场的平衡约束, 克服非平衡问题. 以2008年初的一次南方雨雪天气为研究个例, 进行了数字滤波弱约束的同化试验和预报试验, 结果表明, 数字滤波弱约束4D-Var能充分控制快波振荡的出现和初始调整现象, 使得到的分析场不仅能更好的逼近观测, 而且能更好地与模式动力相协调. 预报检验的结果表明, 在同化过程中施加数字滤波弱约束, 能有效滤除由于地形或观测资料等因素带来的初始噪声信息, 改善分析场的平衡性质, 从而提高预报质量.

关键词: 变分同化, 初始非平衡, 数字滤波, 弱约束

PACS: 92.60.Wc

1. 引言

资料变分同化技术是近年气象数值预报领域的研究热点之一^[1-4], 其目的是为数值预报模式提供优质的初始场. 当前国际上先进的气象业务中心多采用四维变分同化(4D-Var)来生成初始场. 为了在提高模式分辨率的情况下控制计算量的剧增, 实际应用中多采用4D-Var的增量形式^[5], 把来自不同观测源的观测信息和大气状态先验估计的信息(即背景场)结合起来, 由资料变分同化生成分析增量, 把分析增量加到背景状态上得到新的初始场, 由此开始预报. 然而, 这个过程会扰乱模式内部的动力平衡, 导致激发出与重力惯性波相关的快波振荡. 为了滤除这些模式积分初期存在的高频振荡, 消除初始非平衡, 气象学者发展了各种初始化途径, 如Miyakkoda和Moyer^[6]提出的动力初始化, Machenhauer^[7]提出的线性规模初始化, 以及Baer等^[8]提出的非线性正规规模初始化(NNMI)等, 其中NNMI应用较为广泛. NNMI方法从原始方程模式中求出特征解和相应的特征频率, 让重力波的初始倾向为零, 从初始场中滤除重力波. NNMI方法能较有

效地消除初值中的不协调, 过滤“高频”噪声, 但其计算过程复杂, 对不同模式的通用性差. Lynch和Huang^[9]提出了一种基于数字滤波的简单有效的初始化方法, 且能像NNMI一样有效滤除快波振荡.

国际上先进的业务中心, 如欧洲的ECMWF (European Center for Medium range Weather Forecasts)和美国的NCEP (National Centre of Environment Prediction)等的数值预报系统中多采用变分同化方法, 初始化方法可以在同化中作为强约束来滤除模式场的初始噪声, 还可以作为弱约束项, 将重力波控制项以惩罚项的形式加入同化系统中, 把资料分析过程和初始化过程结合在一起, 使最小化问题的解更好地逼近观测, 同时具有很好的平衡性.

Courtier和Talagrand^[10]的研究发现, 基于NNMI的强约束不能充分控制重力波噪音, 由NNMI强约束消除的小尺度噪声会在最小化过程中重建. 他们还把NNMI及其伴随作为惩罚项引入4D-Var, 然而由于该方法需要NNMI的伴随模式, 因而约束依赖于具体的模式和NNMI.

Gustafsson^[11]最早在4D-Var框架下实现数字滤波, 将4D-Var中的数字滤波应用于一维潜水波模

* 国家自然科学基金(批准号:40775064)资助的课题.

† E-mail: wangshuchang@126.com

式,定义滤波和未滤波的模式状态之间的差为惩罚项,把数字滤波的弱约束形式引入 4D-Var 的代价函数,使平衡约束和观测逼近结合起来. Polavarapu, Tanguay 和 Fillion^[12] 在强约束和弱约束的情况下延续了这一思想,利用浅水波模式研究了数字滤波作为强约束时对小尺度噪音的控制情况,但是其采用的模式动力过程是绝热的,且在代价函数中没有考虑背景场误差项. Gauthier 和 Thépaut^[13] 测试了法国气象局的预业务 4D-Var 系统中的数字滤波弱约束,结果显示,施加强约束后有效控制了高频振荡的出现,并能更好地逼近观测. Wee 和 Kuo^[14] 在 MM5 模式的 4D-Var 系统中把数字滤波作为四维变分的弱约束条件,但为了简化起见忽略了背景项的作用.

在实际的资料同化系统中,三维变分同化的重力波控制弱约束一般是基于正规模初始化的;在 4D-Var 环境下,利用数字滤波作为弱约束可以更好地适应 4D-Var 随时间演变的客观需求,也是重力波控制弱约束技术的一种发展. 本文将利用预业务 4D-Var 系统下的数字滤波弱约束技术,研究重力波控制弱约束 4D-Var 的相关特征和机理,及其对同化和预报结果的影响.

2. 数字滤波弱约束基本算法

Gustafsson^[11] 提出弱约束形式的数字滤波,在代价函数中加入了一个惩罚项,引入重力波控制弱约束,将 4D-Var 的代价函数扩展为

$$J = J_b + J_o + J_{c-DF}, \quad (1)$$

其中 J_b 是背景场项, J_o 观测项, J_{c-DF} 为重力波控制弱约束项,此时,引入弱约束的 4D-Var 即对此新定义的代价函数求最小化. 惩罚项 J_{c-DF} 定义为滤波前后的模式状态量之差,其表达式为

$$J_{c-DF} = \alpha^2 \langle x_j - x_j^{DF}, x_j - x_j^{DF} \rangle, \quad (2)$$

其中 $\langle \rangle$ 表示内积, x_j 是第 j 时步上的模式状态量, x_j^{DF} 为滤波后的模式状态量,其定义式写为

$$x_j^{DF} = \sum_{k=0}^{2N} h_{k-N} x_{j+k-N}, \quad (3)$$

其中傅氏系数 h_n 为

$$h_n = \frac{1}{2\pi} \int_{-\theta_c}^{\theta_c} \exp(in\theta) d\theta = \frac{\sin(n\theta_c)}{n\pi}.$$

当第 j 时步为 t_0 时刻时,即 $t_0 = j\Delta t$ 时,当 $N\Delta t \leq t_0 \leq T - N\Delta t$ 时,在滤波区间的中点 t_0 时刻得到滤波后的状态量值,且 $T = K\Delta t$ 是同化窗口的长度. 当 $j = N$ 时,滤波区间(或时间跨度)对强、弱约束而言

是相同的,因为滤波区间必须在同化周期内,控制变量仍是在同化初始时刻的状态变量,这和无约束的情况相同.

J_{c-DF} 的一阶变分写为

$$\delta J_{c-DF} = 2\alpha^2 \langle (x_j - x_j^{DF}), (\delta x_j - \delta x_j^{DF}) \rangle. \quad (4)$$

把 x_j^{DF} 定义式(3)式代入到(4)式可得

$$\delta J_{c-DF} = -2\alpha^2 \sum_{k=0}^{2N} g_{k-N} \langle (x_j - x_j^{DF}), \delta x_{j+k-N} \rangle, \quad (5)$$

其中

$$g_{k-N} = \begin{cases} h_{k-N}, & k \neq N, \\ h_{k-N} - 1, & k = N. \end{cases}$$

由(5)式可见,除了观测引起的强迫之外,由于弱约束滤波的存在,伴随模式可能会生成一个附加的强迫,该强迫仅在时间区间 $t_0 - N\Delta t \leq t \leq t_0 + N\Delta t$ 上起作用,在 $t_0 + (k - N)\Delta t$ 时刻上,该强迫项为 $-2\alpha^2 g_{k-N}(x_j - x_j^{DF})$.

由于并不是仅在 t_0 时刻上对模式变量进行滤波,而是在时间 t_1 和 t_2 之间的所有时次的模式状态都进行滤波,其中, $t_1 \geq N\Delta t, t_2 \leq T - N\Delta t$, 因而相比强约束而言,弱约束的数字滤波更广义一些.

3. 数值试验

3.1. 天气过程

数值试验以 2008 年 1 月 31 日至 2 月 2 日的雨雪天气过程为研究个例.

2008 年 1 月 10 日至 2 月 2 日期间,全国范围出现罕见低温雨雪冰冻灾害. 持续低温雨雪冰冻天气给湖南、湖北、安徽、江西、广西、贵州等 20 个省(区、市)造成重大灾害,特别是对交通运输、能源供应、电力传输、通讯设施、农业生产、群众生活造成严重影响和损失,受灾人口达 1 亿多人,直接经济损失达 400 多亿元,农作物受灾面积和直接经济损失,均已经超过去年全年低温雨雪冰冻灾害造成的损失.

2008 年 1 月 31 日至 2 月 2 日,受冷暖空气的共同影响,贵州东南部、湖南大部、江西北部、湖北东南部、安徽南部、江苏南部以及浙江中北部等地出现中到大雪,其中,湖南中南部、安徽南部、江西北部、浙江北部等地的局部地区出现了暴雪. 从环流形势来看,东亚大槽平直,副高较常年偏强,南支槽异常活跃,从欧亚大陆到南印度洋,大气环流

相对稳定,这种稳定的形势有利于南方的暖湿气流北上,同时也有利于北方的冷气流南下,两股气流在南方的湖南、湖北、江西等地区相遇,暖湿气流被抬升,水汽冷却凝结而产生降雪.由于控制冷暖气流的大气环流都相对稳定,冷暖空气长时间的对峙造成持续性的低温、雨雪冰冻天气过程.

3.2. 试验基本设置

通过同化试验来对数字滤波弱约束的特征和滤波性能等进行分析,设置控制试验为 N_0-J_c ,即无重力波控制项的 4D-Var 试验;弱约束试验为 J_{c-DF} ,即采用数字滤波作为重力波控制项的 4D-Var 试验.

同化试验中,准业务同化系统采用多分辨率增量同化,包括了两次最小化循环,其主最小化采用低分辨率模式 T95L31,次最小化较高分辨率模式是 T159L31. J_{c-DF} 试验和 N_0-J_c 试验采用相同的 12 h 同化窗,利用的观测数据为每 6 h 的实时常规观测资料,从分析时刻的前 3 h 开始检索观测资料,资料类型包括:

SYNOP:人工或自动的地面观测,以及船舶观测,观测变量有气压,高度场,风场和相对湿度;

AIREP(AMDAR):飞机观测,观测变量为温度和风场;

TEMP:探空气球观测(可在地面或船舶放气球),变量包括高度场,风场和比湿;

PILOT:垂直风廓线,观测变量为风场.

3.3. 滤波参数设置

滤波参数的设置需要考虑不同的滤波类型,惩罚参数,截断周期,滤波时间跨度,积分时步等,相同的同化系统设置下,不同的滤波参数设置对同化结果以及之后的预报结果都将有所影响.首先通过一组滤波试验来确定较合理的滤波类型和惩罚参数的设置.改变惩罚参数 λ ,可以控制约束的程度,需要确定 λ 的适当值.

根据准业务同化系统关于模式分辨率、积分步长和同化窗口长度等相关设置,并参考了文献[13]中的试验参数设置.常用的滤波类型为 Dolph-Chebyshev window 和 Dolph-Chebyshev filter.对这两种滤波类型,分别设置了 DOL-WIN 试验和 DOL-FIL 试验,两者的滤波参数和同化相关参数设置见表 1(a)和表 1(b).

表 1(a) 滤波类型为 DOLPH-CHEBYSHEV WINDOW 的 J_{c-DF} 试验的参数设置

试验名	最小化过程	TIME-STEP/s	CUT-OFF PERIOD/h	TIME-SPAN/h	TIME-STEPS
DOL-WIN	主最小化	3600	6	12	12
	次最小化	1800	6	12	24

表 1(b) 滤波类型为 DOLPH-CHEBYSHEV FILTER 的 J_{c-DF} 试验的参数设置

试验名	最小化过程	TIME-STEP/s	STOP-BAND EDGE/h	TIME-SPAN/h	TIME-STEPS
DOL-FIL	主最小化	3600	5	12	12
	次最小化	1800	5	12	24

表 2 不同参数设置的 J_{c-DF} 同化试验的最小化代价函数各项最终优化值结果

惩罚参数 λ	试验名	总观测数 N	代价函数 J_0	J_0/N	代价函数 J_b	代价函数 J_c
—	N_0-J_c	192383	247060.4	1.28	50645.3	—
100	DOL-WIN	192383	250522.6	1.30	49268.9	1983.5
10	DOL-WIN	192383	247528.7	1.29	50246.5	768.6
100	DOL-FIL	192383	269313.0	1.40	47558.4	5259.9
10	DOL-FIL	192383	251101.6	1.31	48854.3	2432.1

表 2 给出的是最后一次最小化迭代得到的最优代价函数中,在滤波前后和不同滤波参数试验的代价函数各项的变化情况,引入数字滤波弱约束之后,代价函数的观测项 J_0 增大了,而背景项 J_b 项减

小了,这说明数字滤波弱约束要求分析逼近观测的同时保持平衡特征,同化的最小化过程通过弱约束滤去了可能产生噪音的观测,使得最终的分析场与模式动力更好的协调.而且,相比而言,当惩罚参数

取较大值 ($\lambda = 100$) 时, J_c 代价函数的绝对数值显著偏大, 对高频噪音的控制程度更好, 更多地要求分析场的平衡性质, 得到的分析场逼近观测的同时能更好地与模式动力相协调. 对滤波类型而言, Dolph-Chebyshev Filter 比 Dolph-Chebyshev Window 具有更优越的性能.

表 2 中还引入了一个量 J_o/N , 其中 N 为同化所用的观测资料总数, 根据 Dee^[15] 的研究, 当模式无误差时, 而且观测误差和背景误差都满足高斯分布且两者不相关的情况下, 观测残差的数学期望值就应该等于与观测的总个数相等, 即满足

$$\frac{(J_o)_{\min}}{N} = 1.$$

但是, 实际情况下模式存在误差, 因而上式应写为

$$\frac{(J_o)_{\min}}{N} = 1 + q_N^2,$$

其中, q_N 表示模式误差相对于观测误差的残差的大小, 由于数字滤波弱约束包含了对模式的正向和逆向积分过程, 因而能在一定程度上反映模式误差, 施加了数字滤波弱约束之后得到的 J_o/N 的值有所增大, 而且当惩罚参数较大时, 对模式误差的反映相对较多.

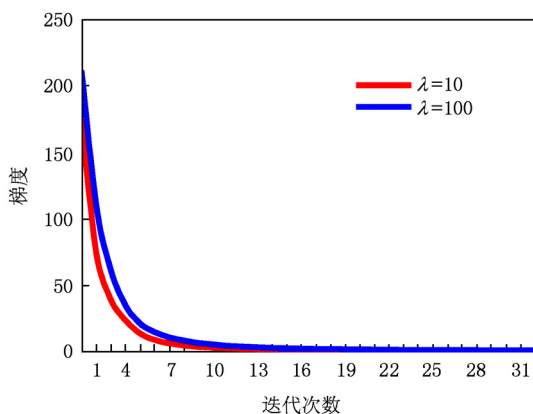


图 1 不同惩罚参数的 J_{c-DF} 试验的最小化过程中梯度随迭代次数递减的情况

图 1 给出的是不同惩罚参数的数字滤波弱约束同化试验的代价函数的梯度随迭代次数的递减情况, 与表 2 的结果一致, 当惩罚参数取较大值 ($\lambda = 100$) 时, 代价函数的值相对较大, 主要是由于代价函数中观测项 J_o 和惩罚项 J_c 较大, 初始的 17 次迭代中, $\lambda = 100$ 时的代价函数的梯度值都比 $\lambda = 10$ 时的值大, 但是, 在此之后, 梯度值都收敛到接近于

1, 因而, 惩罚参数取较大值时, 代价函数的梯度下降的速度更快.

由上, 可以认为选用 Dolph-Chebyshev filter 滤波类型和较大惩罚常数 ($\lambda = 100$), 这样的滤波参数设置得到的同化结果更好, 以下的弱约束同化试验 J_{c-DF} 和相应的预报试验都采用这种参数设置.

3.4. 同化试验分析

同化试验 N_o-J_c 和弱约束试验 J_{c-DF} 的分析主要讨论数字滤波弱约束对初始噪音的控制情况, 以及对同化效果的影响. 图 2 是 N_o-J_c 试验和 J_{c-DF} 试验得到的分析时刻 ($t = 0$) 相对于 $t = 1$ h 时刻的 500 hPa 垂直速度的变化, 从等值线的密集程度和数值大小可以很直观的看到, 数字滤波弱约束之后得到的垂直速度的变化明显减小, 特别是在 30°N 附近的高原地形区, 对初始噪音的滤除减小了初始垂直速度变化的振幅.

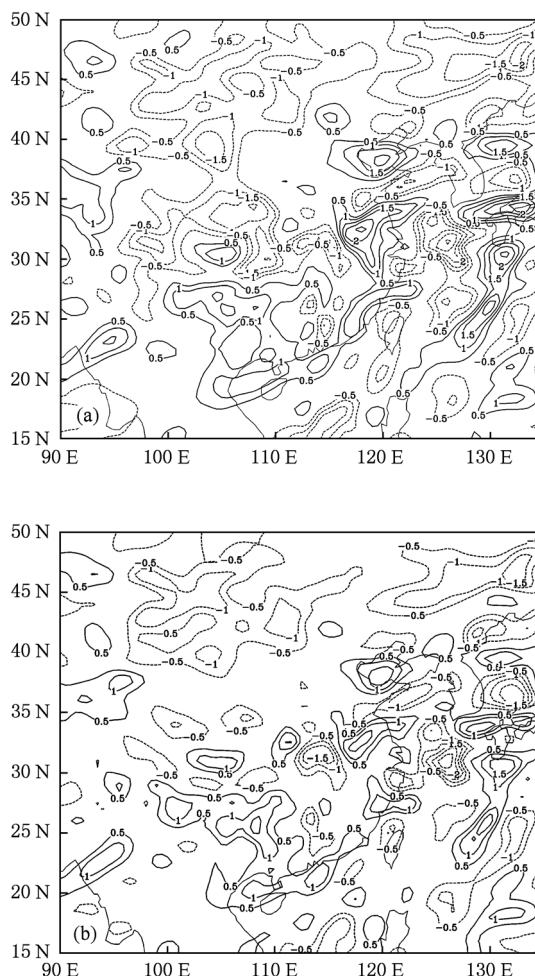


图 2 N_o-J_c 试验 (a) 和 J_{c-DF} 试验 (b) 的 500hPa 垂直速度 (单位: cm/s) 的初始速度变化分布

上述分析显示,相比 N_0-J_c 而言, J_{c-DF} 的结果的平衡性更好,由于弱约束是通过调整模式轨迹来逼近观测,就自然在动力约束上施加了平衡. 数字滤波弱约束能有效控制高频振荡,消除大气虚假特征,从而更好的描述影响实际天气过程的中、小尺度信息.

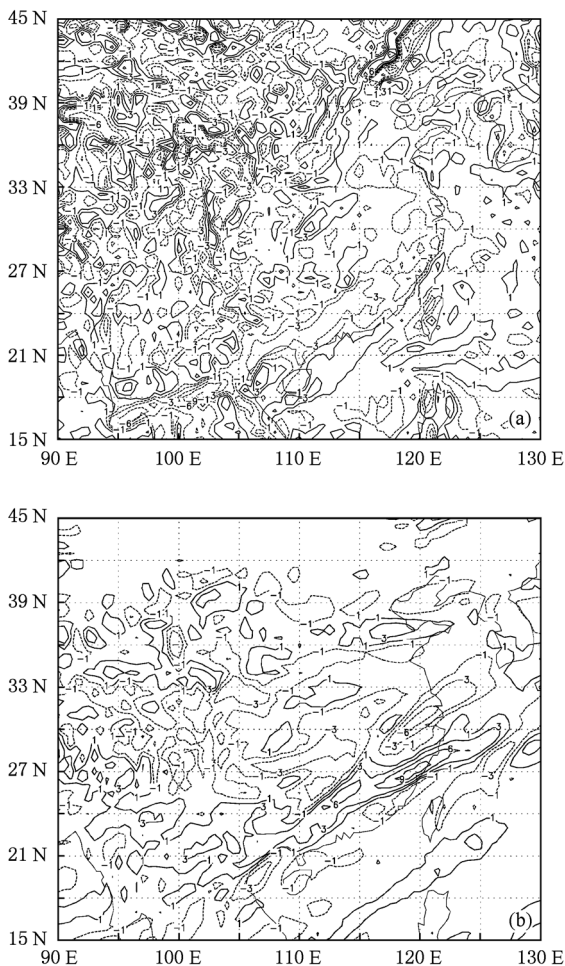


图3 N_0-J_c 试验 (a) 和 J_{c-DF} 试验 (b) 在积分初始时刻的 850 hPa 散度(单位: $10^{-5} s^{-1}$) 分布

对于初始 850 hPa 散度的分布情况(图 3)也存在类似的结果, N_0-J_c 试验的初始散度分布零乱, J_{c-DF} 试验显著改善了散度零乱分布的情况,一方面大幅减小了西部的散度值,另一方面突出了东部降水区的带状散度大值区,可见,数字滤波弱约束对初始噪音的有效控制,在很大程度上滤除了杂波,并保留了与实际天气系统相对应的特征尺度波. 由此,以上关于垂直速度和低层散度的试验结果说明,数字滤波弱约束四维变分同化得到的分析场具有较好的平衡特征,有效滤除了初始高频波,更准

确的反映实际天气系统的特征波动. 可见,数字滤波弱约束虽然只是作为惩罚项加到四维变分同化中,但是它象在外部施加的数字滤波初始化一样,有效控制高频重力波,使得到的分析场逼近观测的同时还具有很好的平衡特性.

3.5. 预报试验分析

为了估计数字滤波弱约束对预报结果的影响,对 2008 年 2 月 2 日 00 时得到的分析场进行了十天预报,分别以 N_0-J_c 试验和 J_{c-DF} 试验的得到分析场作为积分初值,进行的预报试验. 积分模式为全球谱模式,最大谱截断为 511,相当于水平分辨率 38 km,模式层顶气压为 0.1 hPa,垂直方向分 60 层,采用地形跟随的球面混合坐标. 积分时步为 900 s,其他各模式参数设置均相同,前 24 h 每小时输出一次模式积分结果,之后每 3 h 输出一次结果.

之所以要滤除快波振荡,主要是因为快波振荡对垂直运动的影响会最终影响降水. 在预报的起始阶段,即模式向内部动力平衡松弛的阶段,这将导致所谓的初始调整. 这表现在降水形势,以及初始倾向与积分中间时刻得到的倾向之间的差异上.

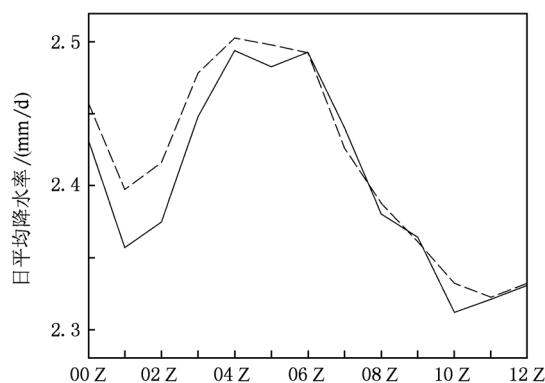


图4 N_0-J_c 试验(实线)和 J_{c-DF} 试验(虚线)的日平均降水率(单位: mm/d) (Pr) 演变

图 4 是日平均降水率随积分时间的演变情况, J_{c-DF} 试验得到的初始降水率大于 N_0-J_c 试验,而且在最初的 4 h 内, J_{c-DF} 试验相比 N_0-J_c 试验缓和了 spin-up 问题,在整个积分时间内, J_{c-DF} 的模拟总降水大于 N_0-J_c 试验,这些特征显示数字滤波弱约束也能像外部数字滤波初始化一样产生与降水相关的初始湿度场,得到与模式动力相协调的湿度场,在一定程度上克服 spin-up 问题.

降水预报结果显示,与之前的分析讨论表明的

结果一样,数字滤波弱约束不仅能使得到的分析结果更逼近观测,还能够像外部初始化过程一样缓和初始调整现象.

下面通过对预报结果的标准统计检验来讨论数字滤波弱约束四维变分同化对之后进行的预报的影响. 检验量主要为均方根误差 (RMSE), 距平相关系数 (CORR) 和技巧评分 (SI). 研究表明, 距平相关系数为 0.60 意味着真实技巧评分大约为 0.2, 也就是与完全精确的预报相距 20%, 此时, 预报可用.

表 3, 表 4 和表 5 分别给出了低层, 中层和高层的 24 h 高度场预报的统计检验结果, 比较弱约束前后的 RMSE, CORR 和 SI 的变化情况, 可以看到对北半球, 赤道地区, 南半球区域, 相比 N_o-J_c 试验, J_{c-DF} 试验得到的各层的高度场的检验参数都有一致的明显改善, 施加数字滤波弱约束之后得到的 RMSE 较小, CORR 值较大, SI 值较小, 可见, 重力波控制弱约束对 24 h 预报有明显的、普遍的积极影响.

相比而言, 重力波控制弱约束对低层 (1000 hPa) 的高度场的正效应较大, 由于低层的高度场受地形影响较大, 包含的与地形相关的初始噪声相应地也较多, 数字滤波弱约束通过对初始高频噪声的有效抑制, 改善了低层高度场的分析值, 使得预报初始场具有更好的平衡特征, 从而保证了较好的预报质量. 对同一垂直层而言, 在赤道地区和南半球的正效应较大, 原因与上述分析类似, 主要是由于这些区域的观测相对缺乏, 观测质量欠佳可能引入了较多的初始噪音信息, 弱约束对噪音的有效滤除使得预报质量提高.

从分析场开始进行十天预报, 随着预报时效延长, 距平相关在不同区域的预报检验可以反映出该区域中的预报效果的好坏程度, 表 6 给出了 500 hPa 高度场距平相关系数随预报时效的变化情况, 从表中数值来看, 南半球的可用预报在 3 天以内, 北半球的可用预报普遍在 6 天以上, 其中, 中纬地区的可用预报在 7 天以上, 且中国区域总体距平相关值都较高, 预报时效达到了 10 天.

数字滤波弱约束对北半球和南半球都有普遍的正效应, 相比而言, 对南半球的正效应较明显, 说明弱约束能在一定程度上克服南半球的初始非平衡问题, 这可能是由于南半球受观测类型和观测数量的局限, 其观测资料对真实大气的反映不够客观, 使得同化的观测信息包含了相对较多的初始噪声, 在同化过程中施加数字滤波弱约束能有效滤除噪声信息, 改善了分析场.

4. 结论与讨论

气象数值预报中, 由于分析过程引入非平衡, 从而引起虚假快波振荡, 本文研究了在 4D-Var 中加入重力波控制惩罚项来实现对分析场的平衡约束.

DFI 能有效滤除虚假高频振荡, 实现起来简单易行, 不仅可以作为初始化过程在同化之外单独进行, 而且可以和同化过程结合在一起, 以弱约束的形式对分析场起作用. 数字滤波弱约束可以通过惩罚参数有效控制最小化过程中的施加约束的程度, 不仅可以改善分析逼近观测的情况, 还能减小分析场的虚假快波振荡, 维持模式内部平衡.

以 2008 年初的一次南方雨雪天气过程为研究个例, 通过同化和预报试验分析了数字滤波弱约束四维变分同化的相关性质和影响. 参数敏感性试验的结果显示, 当惩罚参数取较大值 ($\lambda = 100$) 时, 弱约束对高频噪声的控制程度较高, 而代价函数的梯度下降的速度更快, 一定程度上体现了弱约束对最小化过程的积极影响. 对滤波类型而言, Dolph-Chebyshev Filter 比 Dolph-Chebyshev Window 具有更优的性能. 对同化试验的分析显示, 相比 N_o-J_c 而言, J_{c-DF} 的结果的平衡性更好, 数字滤波弱约束能有效控制高频振荡, 使得到的分析场逼近观测的同时还具有很好的平衡特性, 初始场更客观反映大气真实状态信息, 使得预报能更好的描述实际影响天气过程的中、小尺度信息. 十天预报试验的检验表明, 数字滤波弱约束有普遍的正效应, 尤其是在南半球正效应较明显.

表 3 重力波控制弱约束前后 1000 hPa 高度场的 24 h 预报对分析场的检验比较

检验区域范围	区域格点数	预报试验	均方根误差	距平相关	技巧评分
20°N—90°N	4176	J_{c-DF}	16.1	0.933	24.0
		N_o-J_c	20.6	0.900	27.0
20°S—20°N	2448	J_{c-DF}	19.3	0.640	36.2
		N_o-J_c	23.9	0.395	41.7
20°S—90°S	4032	J_{c-DF}	16.3	0.917	24.1
		N_o-J_c	23.5	0.857	34.2

表4 重力波控制约束前后 500 hPa 高度场的 24 h 预报对分析场的检验比较

检验区域范围	预报试验	均方根误差	距平相关	技巧评分
20°N—90°N	J_{c-DF}	16.7	0.953	15.6
	N_o-J_e	18.2	0.941	16.6
20°S—20°N	J_{c-DF}	18.8	0.662	45.5
	N_o-J_e	23.5	0.323	53.7
20°S—90°S	J_{c-DF}	18.4	0.923	20.1
	N_o-J_e	23.2	0.890	25.4

表5 重力波控制约束前后 100 hPa 高度场的 24 h 预报对分析场的检验比较

检验区域范围	预报试验	均方根误差	距平相关	技巧评分
20°N-90°N	J_{c-DF}	16.3	0.983	10.4
	N_o-J_e	17.8	0.978	11.1
20°S-20°N	J_{c-DF}	21.6	0.704	42.6
	N_o-J_e	27.9	0.503	46.3
20°S-90°S	J_{c-DF}	21.9	0.909	16.6
	N_o-J_e	26.3	0.870	18.4

表6 重力波控制约束前后 500 hPa 高度场距平相关系数随预报时效的演变

检验区域	预报试验	预 报 时 效					
		48 h	72 h	96 h	120 h	144 h	168 h
北冰洋	No-Jc	0.973	0.939	0.739	0.734	0.861	0.503
	Jc-DF	0.974	0.941	0.742	0.737	0.860	0.504
北半球高纬	No-Jc	0.968	0.946	0.755	0.724	0.553	0.407
	Jc-DF	0.968	0.946	0.756	0.726	0.553	0.406
北半球中纬	No-Jc	0.961	0.939	0.896	0.856	0.774	0.825
	Jc-DF	0.964	0.942	0.899	0.856	0.772	0.823
南半球	No-Jc	0.751	0.707	0.498	0.433	0.359	0.490
	Jc-DF	0.786	0.729	0.514	0.445	0.367	0.491

- [1] Huang S X, Han W, Wu R S 2004 *Chin. Science D* **47** 630
- [2] Huang S X, Sheng Z 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 6720 (in Chinese)[黄思训、盛 峥 2006 物理学报 **55** 6720]
- [3] Huang S X, Cai Q F, Xiang J 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 2607 (in Chinese)[黄思训、蔡其发、项 杰 2007 物理学报 **56** 2607]
- [4] Cao X Q, Huang S X, Du H D 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 1984 (in Chinese)[曹小群、黄思训、杜华栋 2008 物理学报 **57** 1984]
- [5] Courtier P, Thépaut J N 1994 *Q. J. R. Meteorol. Soc.* **120** 1367
- [6] Miyakoda K, Moyer R 1968 *Tellus* **20** 115
- [7] Machenhauer B 1977 *Atmos. Phys.* **50** 253
- [8] Baer F, Tribbia J 1977 *Mon. Wea. Rev.* **105** 1536
- [9] Lynch P, Huang X Y 1992 *Mon. Wea. Rev.* **120** 1019
- [10] Courtier P, Talagrand O 1990 *Tellus*. **42** A 531
- [11] Gustafsson N 1992 *Proc. Workshop on Variational Assimilation with Special Emphasis on Three-dimensional Aspects*. United Kingdom; Reading, European Centre for Medium-Range Weather Forecasts.
- [12] Polavarapu S, Tanguay M, Fillion L 2000 *Mon. Wea. Rev.* **128** 2491
- [13] Gauthier P, Thépaut J N 2001 *Mon. Wea. Rev.* **129** 2089
- [14] Wee T K, Kuo Y H 2004 *Mon. Wea. Rev.* **132** 543
- [15] Dee D P 1995 *Mon. Wea. Rev.* **123** 1128

Tests and analysis of digital filter weak constrain in data assimilation*

Wang Shu-Chang^{1)†} Li Yi²⁾ Zhang Wei-Min¹⁾ Zhao Jun¹⁾ Cao Xiao-Qun¹⁾

1) (*School of Computer Science, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China*)

2) (*Institute of Meteorology, People's Liberation Army University of Science and Technology, Nanjing 211101, China*)

(Received 27 July 2010; revised manuscript received 15 December 2010)

Abstract

Variational data assimilation is an advanced technique to provide correct and high quality initial fields for the numerical model. Digital filter is not restricted to initialization; it may also be implemented as a weak constraint penalizing the analysis towards a balanced state in a preoperational 4D-Var system. The constraint is imposed only on the analysis increments to damp spurious fast oscillations associated with gravity - inertia waves. The influence of DFI as a weak constraint on 4D-Var forecast is assessed by assimilation experiments with the recently occurring severe snow weather. It is shown that the weak constraint imposed only on the increments manages to control efficiently the emergence of fast oscillations in the resulting forecast while maintaining a closer fitting to the observations.

Keywords: variational data assimilation, initial imbalance, digital filter initialization, weak constraint

PACS: 92.60.Wc

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 40775064).

† E-mail: wangshuchang@126.com