王琴,王盘兴,李泓. 2010. 基于集合的观测资料影响性评价——简单 AGCM 的理想试验 [J]. 大气科学,34 (4):793-801. Wang Qin, Wang Panxing, Li Hong. 2010. Ensemble-based estimation of observation impact—Simplified AGCM perfect experiments [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 34 (4):793-801.

基于集合的观测资料影响性评价—— 简单 AGCM 的理想试验

王琴^{1,2} 王盘兴¹ 李泓²

1 南京信息工程大学大气科学学院,南京 2100442 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

摘 要 在Liu and Kalnay (2008)的研究基础上,将基于集合的观测资料影响性评价方法(简称LK08法)运用 到一个简单的大气环流模式中,对模拟探空资料的预报影响性进行了综合评价,考察了LK08法在真实大气环流 模式上的适用性。研究结果表明,应用基于集合的评价方法可以一次性计算出同化系统中每个观测的影响性,然 后按观测手段、观测区域等进行影响性数值的简单累加,以此可以比较不同类型观测的相对影响性。比较结果显 示,不同半球的模拟探空观测对预报的总影响性相差不大,但由于南半球资料个数要远远少于北半球,因此,南 半球单个观测的影响性要大于北半球的单个观测。不同观测类型对预报的总影响性也不相同。有效性验证分析 表明,按LK08法计算得到的总体观测影响性能解释实际影响性的70%~80%,且很好地抓住了其变化和走势。 关键词 观测资料影响性 集合 局地集合变换卡尔曼滤波(LETKF) SPEEDY模式 **文章编号** 1006-9895 (2010) 04-0793-09 **中图分类号** P413 **文献标识码** A

Ensemble-Based Estimation of Observation Impact—Simplified AGCM Perfect Experiments

WANG Qin^{1, 2}, WANG Panxing¹, and LI Hong²

1 School of Atmospherics Science, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

2 Laboratory of Typhoon Forecast Technique, Shanghai Typhoon Institute of China Meteorological Administration, Shanghai 200030

Abstract Experiments of assessing observation impact with a simplified parameterization AGCM model are carried out to examine how the ensemble-based estimation method proposed by Liu and Kalnay (2008) (LK08) can be applied to the state-of-art models. The results show that LK08 can successfully estimate each observation's impact at once and then the impact values can be simply summed and grouped according to various types of observations or different areas. Although the summed observation impacts for the two hemispheres are similar, the individual observation impact in the Southern Hemisphere is much larger than that in the Northern Hemisphere due to the sparse observations there. The impacts for different observational types are also different. The estimated total observation

通讯作者 李泓, E-mail: lih@mail. typhoon. gov. cn

收稿日期 2009-08-17, 2010-02-03 收修定稿

资助项目 国家自然科学基金资助项目 40975067,科技部公益性行业(气象)科研专项 GYHY200806029,上海市气象局科技开发项目 MS200806

作者简介 王琴, 女, 1986年出生, 硕士研究生, 研究方向: 资料同化。E-mail: ll-ml@sohu.com

impact accounts for 70%-80% of the actual impact and captures the variations of actual impact very well. **Key words** observation impact, ensemble, local ensemble transform Kalman filter (LETKF), SPEEDY model

1 引言

资料同化将背景场的信息与观测资料进行融合 得到与真实场最为相似的估计场,是数值预报系统 的核心工程。随着探测技术的发展,可获得的卫星 资料越来越多,但由于计算资源的限制,数值业务 预报系统只能同化很少一部分的卫星资料,例如高 频率红外卫星(AIRS)所提供的资料只有几千分之 一被用进同化系统(Goldberg et al., 2003)。在有 限的资料选取范围内,也还存在着质量差、对预报 不起作用甚至起负作用的观测资料(Le Marshall et al., 2006)。因此,如何挑选出那些最有益于预 报的观测资料对提高预报准确率、节约计算资源有 着重要的意义。

传统的评价观测资料的方法是做所谓的观测系 统实验(Observation System Experiments,简称 OSEs),即比较加入与剔除某类观测之后系统预报 结果的变化从而评定观测的好坏(Zapotocny et al., 2002)。目前,OSEs仍是研究观测资料影响性的常 用方法,但主要用于评价某一类或有限的几类观测 资料,如下投式探空(Liu and Zou, 2001)、云迹风 资料(Rohn et al., 2001; 王栋梁等, 2005)、雷达资 料(Xiao et al., 2005; 盛春岩等, 2006)、AIRS 卫 星资料(Chahine et al., 2006)等等。该方法很直 观,但对多类资料需进行多次实验。例如,要评价 一个卫星观测系统中每个信道的资料好坏时,就需 要做几千次实验,这种情况下 OSEs 方法难以实 现。

Langland and Baker (2004)提出了一种基于 伴随敏感性的观测资料影响性综合评价方法(简称 LB04 法),并利用该方法评估了美国海军 NOGAPS-NAVDAS系统中观测资料对预报的影 响性。LB04 法可以一次性计算出同化系统中每一 个观测资料的影响性大小,然后可根据感兴趣的分 类标准(如仪器类型、观测变量、地理区域等)进 行任意的组合(将观测资料影响性相加即可),进 而综合评价出不同类型资料对预报的相对影响性。 该方法还可以根据影响性的正负来监测观测资料的 质量,找出对预报起负作用的资料。美国航天航空 局的全球模式和同化办公室(NASA/GMAO)利用LB04法对其准业务预报系统中的各种资料进行 了综合评价(Zhu and Gelaro, 2008),发现传统资料和卫星资料对预报的影响有季节性和半球性差异,这与OSEs得到的结论一致,但计算量显著降低。然而,LB04法需要用到预报模式的伴随和同化系统的伴随,而大多数模式都没有现成的伴随模式,这就限制了该方法的广泛应用。

Liu and Kalnay (2008) 提出利用集合敏感性 估算观测资料影响性的方法(简称 LK08 法)。此 方法不需要伴随模式,但具有与 LB04 法一样的评 价功能,即同时计算出同化系统中每一个观测资料 的影响性。Liu 和 Kalnay (2008)在一个简单模式 ——Lorenz-40 模式上对该方法进行测试,成功评 价了模拟资料的影响性。然而,Lorenz 模式中的变 量无量纲无任何物理意义,与实际模式差别极大。 为了今后能将 LK08 法运用到业务模式中去,本文 选用一个大气环流模式——SPEEDY 模式进行实验。 SPEEDY 模式是一个物理参数化过程相对简单的大 气环流模式,但能模拟真实的大气环流状况。

本文利用 SPEEDY 模式和局地集合变换卡尔 曼滤波 (LETKF) (Hunt et al., 2007) 同化技术同 化模拟的探空资料,并利用 LK08 法评价模拟观测 对预报的影响性。文章的结构分为:对局地集合变 换卡尔曼滤波技术的简单介绍,LK08 观测资料影 响性评价方法的介绍,模式、资料和实验设计,结 果分析,最后是结论与讨论。

2 LETKF 同化方法简单介绍

首先,我们给出一般意义上的集合卡尔曼滤波 公式:

$$\boldsymbol{P}^{\mathrm{b}} = \frac{1}{K-1} \boldsymbol{X}^{\mathrm{b}} \boldsymbol{X}^{\mathrm{bT}}, \qquad (1)$$

$$\boldsymbol{K} = \boldsymbol{P}^{\mathrm{b}}\boldsymbol{H}^{\mathrm{T}} + [\boldsymbol{H}\boldsymbol{P}^{\mathrm{b}}\boldsymbol{H}^{\mathrm{T}} + \boldsymbol{R}]^{-1}, \qquad (2)$$

$$\boldsymbol{x}^{\mathrm{a}} = \boldsymbol{x}^{\mathrm{b}} + \boldsymbol{K} [\boldsymbol{y}^{\mathrm{o}} - \boldsymbol{H}(\boldsymbol{x}^{\mathrm{b}})], \qquad (3)$$

$$\boldsymbol{P}^{\mathrm{a}} = (\boldsymbol{I} - \boldsymbol{K}\boldsymbol{H})\boldsymbol{P}^{\mathrm{b}}, \qquad (4)$$

其中, x^a 是变量的分析场矩阵; x^b 是变量的背景场 矩阵; y^o表示观测场; X^b 是背景集合扰动矩阵, 它 的第 k 列代表第 k 个集合成员与集合平均之差; P^b 是背景场误差协方差矩阵; P^e 是分析场误差协方 差矩阵; K 为卡尔曼增益矩阵。

在实际应用中,对模式阶数为 10⁷~10⁸、观测 资料数为 10⁵~10⁶ 的同化系统而言,直接计算(2) 式和(4)式在现有的计算条件下都是不允许的。 对(2)、(3)、(4)式的不同处理方式导致了不同的 集合卡尔曼滤波方法,LETKF 属于其中的一种 (Hunt et al., 2007; Li et al., 2009a)。LETKF 对 (2)式的处理方法是利用(1)式对增益矩阵进行改 写[见(6)式],在集合空间下对矩阵求逆[公式 (5)中 \tilde{P}^{a} 在集合空间上,为 $K \times K$ 阶矩阵,K是集 合成员数],从而大大减少了计算量。对公式(3)、 (4),LETKF 先计算集合平均的分析场[见(7) 式],然后将(4)式改写到集合空间计算分析场的 扰动[见(8)式],最后由(9)式计算得到分析变 量的每一个集合成员。

LETKF的公式可总结为 [具体推导参阅 Hunt et al. (2007)]:

$\widetilde{\boldsymbol{P}}^{\mathrm{a}} = \left[\widetilde{\boldsymbol{H}}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{R}^{-1}\widetilde{\boldsymbol{H}} + (K-1)\boldsymbol{I}\right]^{-1},$	(5)
$1 \sim \infty$	

$$\mathbf{K} = \mathbf{X}^{\mathrm{b}} [\mathbf{P}^{\mathrm{a}} \mathbf{H}^{\mathrm{T}} \mathbf{R}^{-1}], \qquad (6)$$

$$\bar{\boldsymbol{x}}^{\mathrm{a}} = \bar{\boldsymbol{x}}^{\mathrm{b}} + \boldsymbol{K} \lfloor \boldsymbol{y}^{\mathrm{o}} - \boldsymbol{H}(\bar{\boldsymbol{x}}^{\mathrm{b}}) \rfloor, \qquad (7)$$

$$\boldsymbol{X}^{\mathrm{a}} = \boldsymbol{X}^{\mathrm{b}} [(K-1)\boldsymbol{P}^{\mathrm{a}}]^{1/2}, \qquad (8)$$

$$\boldsymbol{x}^{\mathrm{a}} = \boldsymbol{\bar{x}}^{\mathrm{a}} + \boldsymbol{X}^{\mathrm{a}}, \qquad (9)$$

其中, \tilde{P}^{a} 是 LETKF 中特有的一个中间矩阵, 其物 理意义是分析场误差协方差矩阵在集合空间上的投 影; $\tilde{H} = HX^{b}$ 是背景集合扰动在观测空间上的投影。

为避免由于有限的集合成员造成的虚假相关, LETKF采用局地化同化技术。具体做法是:以模 式每个格点为中心点,取一个局地影响半径L,只 同化影响半径内的所有观测。每个模式格点均需进 行一次同化,彼此互不关联,可进行并行运算。最 佳局地影响半径是通过多次同化试验调试得到的, 与同化资料的分布和集合成员个数有关。

3 LK08 观测资料影响性评价方法的 介绍

与 LB04 法一样, LK08 法的基本思路是:通过 比较从 00 时刻起报至 t 时刻与从一06 时刻起报至 t 时刻的预报差异来评价 00 时刻所同化的观测资 料 (见图 1)。图 1 中, a 曲线表示从一06 时刻起报 至 t 时刻,得到 00 时刻的预报场 $\mathbf{x}_{0|-6}^{t}$ 和 t 时刻的 预报场 $\mathbf{x}_{1|-6}^{t}$,此时 t 时刻的预报误差为 $\boldsymbol{\varepsilon}_{t|-6}$; b 曲 线则从 00 时刻起报至 t 时刻,得到预报场 $\mathbf{x}_{t|0}^{t}$,此 时 t 时刻的预报误差为 $\boldsymbol{\varepsilon}_{t|0}$ 。很明显, a、b 曲线分 别代表了预报时效为 t+6 小时和 t 小时的预报。 就 00 时刻而言, a 曲线表示从背景场 $\mathbf{x}_{0|-6}^{t}$ 起报的 t 小时预报,而 b 曲线则是从分析场 \mathbf{x}_{00}^{t} (由背景场 $\mathbf{x}_{0|-6}^{t}$ 经过同化 00 时刻观测资料之后得到)起报的 t 小时预报,二者的差异 ($\boldsymbol{\varepsilon}_{t|0} - \boldsymbol{\varepsilon}_{t|-6}$)在于 00 时刻对 观测资料的同化。

令:

$$\boldsymbol{\varepsilon}_{t|-6} = \bar{\boldsymbol{x}}_{t|-6}^{\mathrm{f}} - \boldsymbol{x}_{t}^{\mathrm{t}}, \qquad (10)$$

$$\boldsymbol{\varepsilon}_{t|0} = \bar{\boldsymbol{x}}_{t|0}^{\mathrm{f}} - \boldsymbol{x}_{t}^{\mathrm{t}}, \qquad (11)$$

分别代表了-06 时刻(00 时刻)起报的预报场 $\bar{x}_{t|-6}^{t}(\bar{x}_{t|0}^{t})$ 与t时刻真实场 x_{t}^{t} 的差异(在实际应用 中 x_{t}^{t} 可用t时刻的分析场代替)。

定义一个目标函数: $J = \frac{1}{2} (\boldsymbol{\varepsilon}_{t|0}^{\mathrm{T}} \boldsymbol{\varepsilon}_{t|0} - \boldsymbol{\varepsilon}_{t|-6}^{\mathrm{T}} \boldsymbol{\varepsilon}_{t|-6}) = \frac{1}{2} (\boldsymbol{\varepsilon}_{t|0} + \boldsymbol{\varepsilon}_{t|-6})^{\mathrm{T}} (\boldsymbol{\varepsilon}_{t|0} - \boldsymbol{\varepsilon}_{t|-6}), \quad (12)$



Fig. 1 A schematic of the impact of observations assimilated at time 0 on forecast at time t

J 是一个标量,表示 t 小时总体预报误差与 t +6 小 时总体预报误差的差异,由上面的分析可知该差异 完全来自于 00 时刻对观测资料的同化。当 J>0时,t 小时预报误差大于 t +6 小时的预报误差,即 00 时刻同化的观测资料对 t 时刻预报有负效果;反 之,J<0 则说明 00 时刻同化的观测资料对预报结 果有正效果。一般情况下同化的总体效果是好的, 因此有 J<0。利用 LETKF 同化公式和集合发散 的特性可以得到 [具体推导请参考 Liu and Kalnay (2008)]:

$$\boldsymbol{\varepsilon}_{t|0} - \boldsymbol{\varepsilon}_{t|-6} = \boldsymbol{x}_{t|0}^{\mathrm{f}} - \boldsymbol{x}_{t|-6}^{\mathrm{f}} = \boldsymbol{X}_{t|-6}^{\mathrm{f}} \widetilde{\boldsymbol{K}} \boldsymbol{v}_{0}, \quad (13)$$

$$\boldsymbol{\varepsilon}_{t|0} + \boldsymbol{\varepsilon}_{t|-6} = 2\boldsymbol{\varepsilon}_{t|-6} + \boldsymbol{X}_{t|-6}^{\mathrm{f}} \widetilde{\boldsymbol{K}} \boldsymbol{v}_{0}, \qquad (14)$$

其中, $X_{t|-6}^{f}$ 是从一06 时刻起报的预报场进行 t+6小时集合预报至 t 时刻的集合成员之间的扰动; \tilde{K} 就是式 (6) 中的 $\tilde{P}^{a}\tilde{H}^{T}R^{-1}$ 项; v_{0} 是 00 时刻的观测 增益 $v_{0} = y^{o} - H(\bar{x}_{0|-6}^{f})$ 。将 (13) 式和 (14) 式代入 (12) 式,得到目标函数 J 在观测空间中的表达式:

$$J = \frac{1}{2} (2\boldsymbol{\varepsilon}_{t|-6} + \boldsymbol{X}_{t|-6}^{f} \widetilde{\boldsymbol{K}} \boldsymbol{v}_{0})^{\mathrm{T}} \boldsymbol{X}_{t|-6}^{f} \widetilde{\boldsymbol{K}} \boldsymbol{v}_{0} = \\ \begin{bmatrix} (\boldsymbol{\varepsilon}_{t|-6} + 0.5 \boldsymbol{X}_{t|-6}^{f} \widetilde{\boldsymbol{K}} \boldsymbol{v}_{0})^{\mathrm{T}} \boldsymbol{X}_{t|-6}^{f} \widetilde{\boldsymbol{K}} \end{bmatrix} \boldsymbol{v}_{0} = \\ \begin{pmatrix} \boldsymbol{v}_{0}, (\boldsymbol{X}_{t|-6}^{f} \widetilde{\boldsymbol{K}})^{\mathrm{T}} (\boldsymbol{\varepsilon}_{t|-6} + 0.5 \boldsymbol{X}_{t|-6}^{f} \widetilde{\boldsymbol{K}} \boldsymbol{v}_{0}) \end{pmatrix} = \\ \sum_{i=1}^{p} \boldsymbol{v}_{0(i)} \cdot (\boldsymbol{X}_{t|-6}^{f} \widetilde{\boldsymbol{K}})^{\mathrm{T}} (\boldsymbol{\varepsilon}_{t|-6} + 0.5 \boldsymbol{X}_{t|-6}^{f} \widetilde{\boldsymbol{K}} \boldsymbol{v}_{0})_{(i)}, \end{cases}$$
(15)

其中,*i*代表某个观测,*p*是观测资料的总个数。 根据公式(15)可以计算出每个观测的影响性:

$$J_{i} = \boldsymbol{v}_{0(i)} \cdot \left[(\boldsymbol{X}_{t|-6}^{\mathrm{f}} \widetilde{\boldsymbol{K}})^{\mathrm{T}} (\boldsymbol{\varepsilon}_{t|-6} + 0.5 \boldsymbol{X}_{t|-6}^{\mathrm{f}} \widetilde{\boldsymbol{K}} \boldsymbol{v}_{0}) \right]_{(i)}.$$
(16)

在得到每个观测资料的影响性之后,我们就可 以根据需要进行任意组合。如:当需要评定某类或 某地区资料的影响性时,只需要将该类或该地区中 所有的观测资料影响性相加即可:

$$J_L = \sum_{i=1}^L J_i,$$

L表示这组观测的总个数。总体目标函数 J 即所有 观测资料影响性的累加。

Liu and Kalnay (2008) 在 Lorenz-40 模式上验 证了 LK08 评价方法的有效性,因 Lorenz 模式中 的变量无量纲,可以直接使用公式 (16)。本研究 中因模拟的探空资料有量纲,且不同观测的量级差 异很大,如不进行处理将不能简单相加不同的观测 影响性。为此,在 LK08 法的公式基础上我们稍作 改进,引入干空气能量方程 (Rabier et al., 1996):

$$E = \frac{1}{2} \left(u^2 + v^2 + \frac{c_p}{T_r} T^2 + \frac{R_d \cdot T_r}{p_r^2} p_s^2 \right), \quad (17)$$

其中, c_p =1005.7 J·kg⁻¹·K⁻¹, T_r =270 K, R_d = 287 J·kg⁻¹·K⁻¹, p_r =10⁵Pa,由此得到的能量单 位为 J/kg (根据重力势能的公式 $E=m \cdot g \cdot h$,可推 得单位 J/kg=m²/s²)。定义一个 C 矩阵其对角线 元素为公式 (17) 中每项的系数,其余非对角线元 素值均为 0。在计算观测资料影响性项时加上 C 矩 阵能使得不同观测影响性的单位一致,从而能从数 值大小上直观地评定出每个观测质量的好坏。为 此,改写公式 (12) 得到目标函数:

$$J = \frac{1}{2} \left(\boldsymbol{\varepsilon}_{t|0}^{\mathrm{T}} \cdot \boldsymbol{C} \cdot \boldsymbol{\varepsilon}_{t|0} - \boldsymbol{\varepsilon}_{t|-6}^{\mathrm{T}} \cdot \boldsymbol{C} \cdot \boldsymbol{\varepsilon}_{t|-6} \right).$$
(18)

于是,总的观测资料影响性的计算式变为:

$$J = \frac{1}{2} \left(2\boldsymbol{\varepsilon}_{t|-6} + \boldsymbol{X}_{t|-6}^{\mathsf{f}} \widetilde{\boldsymbol{K}} \boldsymbol{v}_{0} \right)^{\mathsf{T}} \cdot \boldsymbol{C} \cdot \left(\boldsymbol{X}_{t|-6}^{\mathsf{f}} \widetilde{\boldsymbol{K}} \boldsymbol{v}_{0} \right),$$
(19)

每个观测资料影响性的计算式为:

$$J_{i} = \boldsymbol{v}_{0 (i)} \cdot (\boldsymbol{X}_{t|-6}^{\mathrm{f}} \widetilde{\boldsymbol{K}})^{\mathrm{T}} \cdot \boldsymbol{C} \cdot (\boldsymbol{\varepsilon}_{t|-6} + 0.5 \boldsymbol{X}_{t|-6}^{\mathrm{f}} \widetilde{\boldsymbol{K}} \boldsymbol{v}_{0})_{(i)},$$
(20)

J的单位为J/kg。

4 模式、资料和实验设计

4.1 SPEEDY 模式

本研究使用一个简单的大气环流模式——SPEEDY(Simplified Parameterization primitivE Equation DYnamics)模式(Molteni, 2003)。该模式的分辨率为T30L7,转化成模式网格点为96×48,7层。一方面,因其简单的物理参数化过程和相对粗糙的分辨率,SPEEDY模式运行的速度很快,非常适合在研究中应用(Danforth et al., 2007;Li et al., 2009a, b);另一方面,SPEEDY模式各方面的特性与复杂的业务模式相似,用它来研究LK08法,可以为今后应用到业务模式上打下基础。

4.2 观测资料

在 SPEEDY 模式自由运转得到的"真实"场的 基础上,加上符合高斯分布的观测误差来构造模拟 的观测资料。观测的类型有风 (u, v),温度 (T), 比湿 (q) 及海平面气压 (p_s) 。观测误差的标准差 分别取 u, v 为 1 m/s, T 为 1 K, q 为 10⁻⁴ kg/kg, p_s 为 1 hPa。观测资料的分布模拟真实探空资料的 全球分布,资料长度为 1987 年 1 月 1 日 00 时至 2 月 15 日 18 时 (协调世界时,下同),每隔 6 小时有 一次观测。

4.3 实验设计

首先,利用 SPEEDY-LETKF 系统进行长达一 个半月的预报、同化循环实验。从 1987 年 1 月 1 日 00 时开始每 6 小时用 SPEEDY 模式做一次集合 预报,用 LETKF 做一次同化,同化 4.2 节中的模 拟探空资料至 1987 年 2 月 15 日 18 时结束。由于 计算资源有限,这里将集合成员数取为 30 个, LETKF 中影响半径 L 取为 4。然后,对 1987 年 2 月 1 日 00 时至 2 月 15 日 18 时的同化结果按式 (20) 计算每 6 小时观测资料的影响性。目标函数 J 的定义中取 t=6,即定义 J 为 6 小时预报误差与 12 小时预报误差的差异,利用式 (18) 计算实际预 报误差差异。

5 结果分析

根据公式(20)可以计算出每个模拟观测的影 响性 J_i 。根据定义, $J_i < 0$ ($J_i > 0$)表明该观测对 预报有正效果(负效果)。图2给出了500 hPa上 u, v, T以及地面 p_s 观测资料影响性的全球分布情 况。在资料密集的欧亚及北美大陆上,单个观测的 影响性都很小, 且有正有负; 资料稀少的海洋及两 极地区,单个观测的影响性较大,且以负值为主 (即对预报有正效果)。为了解释这个结果我们以图 2a 为例给出相应的 500 hPa u 的背景场误差(图 3)。图 3 中阴影区为背景场误差较大的地方,主要 分布在海洋和两极地区,即资料匮乏地区。由4.2 节可知不同区域的观测资料的质量是相同的(标准 差均为1m/s),因此,在背景场较差的地区,观测 场优于背景场,因而观测资料所起的作用多为正效 果,即海洋和两极地区的观测影响性值多为负值; 而在背景场本身己较好的地区,观测所起的作用则 可能有正有负,造成陆地上的观测影响性值正负相 间。量值大小方面,由于海洋和两极地区资料量稀 少,故单个观测对同化系统的贡献较大,观测影响 性的量值也较大;而在资料密集的陆地上,单个观 测对同化的贡献比例减小,故影响性的量值也小。 上述分析结果也可以从影响性公式上理解,由于海 洋和两极地区探空资料稀少,造成背景场质量较 差,这使得式(20)中的观测增益项 $v_0 = y^\circ -$

 $H(\mathbf{x}_{0|-6}^{f})$ 很大,同时 $\mathbf{X}_{t|-6}^{f}$ 、 $\tilde{\mathbf{K}}$ 、 $\boldsymbol{\varepsilon}_{t|-6}$ 也都比资料密 集区大,因此,海洋和极地上的单个观测资料的影 响性也较大。

在得到单个观测影响性的基础上,我们就可以 按感兴趣的分类进行任意组合。首先来看不同半球 的影响性,图4a给出了不同半球的观测对全球预 报的影响情况。可以看到,南半球总观测影响性 (点实线) 略小于北半球 (实线), 但由于南半球观 测资料量远少于北半球,故单个观测的影响性(点 虚线)要远大于北半球(虚线)。这里,两半球总体 观测影响性相当的事实是可以理解的:观测资料影 响性即观测对背景场的改善幅度,其大小既取决于 观测资料质量也依赖于背景场本身的好坏。当背景 场较差时,观测资料的同化对其改变较大;反之, 当背景场本身已经很接近实况时,观测资料的作用 就相对较小,这与前面对图2的分析是一致的。本 研究使用的是连续同化循环试验,背景场已包含了 前期大量的观测信息,北半球背景场明显好于南半 球(见图 4b),故而即使北半球的资料比南半球密 很多,其总体观测影响性仍与南半球相当。若南、 北半球背景场质量相当,密集的北半球观测资料对 预报的总体贡献应该大于南半球。

接下来我们按观测变量累加比较不同变量的影 响性。图 5 中给出 u、v、T、q、p。五个变量在不同 半球的总影响性,需要指出的是,纬向风 u、经向 风v以及温度T在7层上都有资料,湿度q只有4 层的资料,海平面气压 ps 是一层。由图 5 可见北 半球的资料量大约是南半球的五倍,但两半球的总 观测资料影响性相差不大,这与图4的结果是一致 的。在资料个数相等的情况下,可以看到风场的观 测资料影响性要比温度场大很多,这与 SPEEDY-LETKF 系统本身的性质有关。图 6 分析了 SPEEDY-LETKF 系统中 u、T 的背景场和分析场 的误差,可以看到u的背景场和分析场比T的要 差。由于我们给定的风场、温度场的观测资料分布 和观测误差是相同的,因此,u、T的差异主要来源 于 SPEEDY 模式对二者的预报能力。由于 u 的背 景场较差,因而纬向风观测资料的同化对 u 背景场 的改变(虚线与点虚线的差)要大于温度场观测资 料对T背景场的改变(实线与点实线的差),即u观测在同化过程中作用大于T观测,从而u观测对 未来预报的影响性也要大于 T 观测。



图 2 1987年2月1日00时~15日18时多时刻平均的观测资料影响性全球分布

Fig. 2 Global distribution of observation impact averaged from 0000 UTC 1 Feb 1987 to 1800 UTC 15 Feb 1987



图 3 1987 年 2 月 1 日 00 时~15 日 18 时平均的 500 hPa u 背景场误差 Fig. 3 Background error for 500-hPa u averaged from 0000 UTC 1 Feb 1987 to 1800 UTC 15 Feb 1987



图 4 (a) 南 (点实线)、北 (实线) 半球垂直方向上累加的所有观测的总体影响性 (左侧纵坐标) 以及南 (点虚线)、北 (虚线) 半球平均单 个观测影响性 (右侧纵坐标)随时间的变化 (单位: J/kg); (b) 南 (实线)、北 (虚线) 半球平均的背景场误差 [按 (17) 式计算得到]随时间的变化 (单位: J/kg)

Fig. 4 (a) Time series of vertically-summed total observation impact for the Northern (solid line) and Southern (dot-solid line) Hemispheres (left ordinate), and averaged observation impact for the Northern (dashed line) and Southern (dot-dashed line) Hemispheres (right ordinate); (b) time series of background energy errors averaged for the Southern (solid line) and Northern (dashed line) Hemispheres derived from Eq. (17)



图 5 1987 年 2 月 1 日 00 时~15 日 18 时平均的总观测资料影响性(按不同半球、不同变量分类)。纵坐标:正值为观测个数,负值为观测影响性(单位:J/kg)

Fig. 5 Vertically-summed observation impact for the Southern and Northern Hemispheres averaged from 0000 UTC 1 Feb 1987 to 1800 UTC 15 Feb 1987 (units: J/kg). Vertical ordinate: the negative (positive) stands for the observation impact (data number)

最后,验证我们估计的观测资料影响性项是否 与实际的影响性一致。从理论上说,将所有按公式 (20) 计算所得到的观测资料影响性相加,得到的 总影响性应该与按公式(18)直接计算得到的目标 函数一致。图7给出了按公式(18)计算出的真实 的6小时与12小时预报误差差异(实线),与全体 观测资料影响性累加所估计的预报误差差异(虚 线)的比较。可以看到,两根线的走势吻合得很 好,但估计值的大小要比真实值小,大约占真实值 的70%~80%(其原因分析见第6节)。这说明估 计观测资料影响性虽然对实际的影响性有所低估, 但能抓住其总体特征及变化。当观测资料对预报结 果有较大的改善作用时,其对应的观测资料影响性 的量值也会偏大,改善较小时,量值也偏小。

6 总结与讨论

本文在 Liu and Kalnay (2008)的基础上将基 于集合的观测资料影响性的方法应用到 SPEEDY 模式上去,对目标函数的定义进行了修改,对 SPEEDY-LETKF 系统中的模拟探空资料进行了综



图 6 全球、垂直方向上平均的误差随时间变化图。点虚线、虚线: 纬向风 u 的背景场误差、分析场误差(单位: m/s); 点实线、实线: 温度场 T 的背景场误差、分析场误差(单位: ℃)

Fig. 6 Time series of globally- and vertically-averaged background error (dot-dashed line) and analysis error (dashed line) for u, and background error (dot-solid line) and analysis error (solid line) for T



图 7 全球、垂直方向上累加的总体观测资料影响性(虚线)与实际 6 小时预报误差减去 12 小时预报误差(实线)的比较(单位: J/kg) Fig. 7 Globally- and vertically-summed observation impact estimated by equation (20) (dashed line) and the actual forecast error reduction from equation (18) (solid line)

合分析,得到合理的结果,证明了该方法能适用于 真实的大气环流模式,一次性综合评价观测系统中 所有观测资料的影响性。在实验过程中,首先利用 式(20)计算出了每个观测资料的影响性,然后按 资料不同区域和类型进行组合分析,得到结论:在 资料密集的大陆上,由于系统预报的背景场较好, 所以观测资料影响性相对较小且有正有负;在海洋 和两极地区由于资料稀疏导致系统预报的背景场 差,故而观测资料影响性较大并且多为负值(即正 效果);由于 SPEEDY-LETKF 系统本身对风场的 预报效果较差,导致风场观测的影响性占了总观测 影响性的很大一部分。在最后的有效性检验中,我 们看到该评价方法对资料的评价是有效的,观测影 响性项所模拟的预报误差差异能很好地拟合出实际 预报误差差异的走势。 需要指出的是,LK08 评价方法所得到的评价 结论是针对当前所评价的系统。不同预报系统由于 模式同化手段、观测资料不同,使用LK08 法所得 到的结论也会有所不同。本文所使用的 SPEEDY-LETKF系统不同于实际的业务模式,同化的资料 也不同(仅同化了常规探空),因此这里所得到的 不同观测影响性的结论(如风场观测影响性大于温 度场、南北半球影响性相当)只适用于当前系统, 在实际业务模式中不一定成立。

在图 7 中,我们看到总体观测资料影响性只能 解释真实误差差异的 70%~80%,这种情况在 Langland and Baker (2004)的文章中也被提出,其 可能的原因是由于伴随模式中未加入湿过程,因 此,在计算观测资料影响性时将水汽的影响性忽略 掉了,使得整体的观测资料影响性的量值偏小。而 这里我们用集合的方法进行评估,不涉及伴随模 式,水汽的影响性是被评估了的(见图5)。影响性 被低估的可能原因是局地化影响半径 L 取的较小 (L=4)的缘故,使得某个观测实际影响的范围超 过规定区域时,超出部分的影响性会被人为的截 掉,导致总体估计值偏小。进一步的实验表明,取 L=5时,估计值占实际影响性值的比例加大了(图 未给出),说明增大局地影响半径有利于更好地估 计影响性。但此时系统同化的效果却变差了,说明 在有限的集合成员条件下,局地影响半径又不能取 太大。要想提高 LK08 法的评价能力,同时又不降 低同化效果,最好的办法是增加集合成员数,但前 提是要有足够的计算资源。

同 LB04 法一样,LK08 法也能根据影响性的 正负来监测观测资料的质量。本研究中,由于给定 的观测资料误差是恒定的、全球均一的,因此无法 检验 LK08 法的这一性质。我们在下一步的工作中 会引入较复杂的观测对这一问题进行研究。

参考文献 (References)

- Chahine M T, Pagano T S, Aumann H H, et al. 2006. AIRS: Improving weather forecasting and providing new data on greenhouse gases [J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 87: 911–926.
- Danforth C M, Kalnay E, Miyoshi T. 2007. Estimating and correcting global weather model error [J]. Mon. Wea. Rev., 135 (2): 281-299.
- Goldberg M D, Qu Y N, McMillin L M, et al. 2003. AIRS near-real-time products and algorithms in support of operational numerical weather prediction [J]. IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., 41 (2): 379-389.
- Hunt B R, Kostelich E J, Szunyogh I. 2007. Efficient data assimilation for spatiotemporal chaos: A local ensemble transform Kalman filter [J]. Physica. D: Nonlinear Phenomena, 230: 112-126.
- Langland R H, Baker N L. 2004. Estimation of observation impact using the NRL atmospheric variational data assimilation adjoint system [J]. Tellus, 56: 189-201.
- Li H, Kalnay E, Miyoshi T, et al. 2009a. Accounting for model errors in ensemble data assimilation [J]. Mon. Wea. Rev., 137: 3407-3419.
- Li H, Kalnay E, Miyoshi T. 2009b. Simultaneous estimation of co-

variance inflation and observation errors within an ensemble Kalman filter [J]. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 135: 523-533.

- Liu H, Zou X. 2001. The impact of NORPEX targeted dropsondes on the analysis and 2 – 3-day forecasts of a landfalling Pacific winter storm using NCEP 3DVAR and 4DVAR systems [J]. Mon. Wea. Rev., 129 (8): 1987 – 2004.
- Liu J J, Kalnay E. 2008. Estimating observation impact without adjoint model in an ensemble Kalman filter [J]. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 134 (634): 1327-1335.
- Le Marshall J, Jung J, Derber J, et al. 2006. Improving global analysis and forecasting with AIRS [J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 87: 891-894.
- Molteni F. 2003. Atmospheric simulations using a GCM with simplified physical parameterizations. I: Model climatology and variability in multi-decadal experiments [J]. Climate Dyn., 20: 175 – 191.
- Rabier F, Klinker E, Courtier P, et al. 1996. Sensitivity of forecast errors to initial conditions [J]. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 122: 121-150.
- Rohn M, Kelly G, Saunders R W. 2001. Impact of a new cloud motion wind product from Meteosat on NWP analysis and forecasts [J]. Mon. Wea. Rev., 129 (9): 2392-2403.
- 盛春岩, 浦一芬, 高守亭. 2006. 多普勒天气雷达资料对中尺度模 式短时预报的影响 [J]. 大气科学, 30 (1): 93-107. Sheng C Y, Pu Y F, Gao S T. 2006. Effect of Chinese Doppler radar data on nowcasting output of mesoscale model [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 30 (1): 93-107.
- 王栋梁,梁旭东,端义宏. 2005. 云迹风在热带气旋路径数值预报 中的应用研究 [J]. 气象学报, 63 (3): 351-358. Wang D L, Liang X D, Duan Y H. 2005. Impact of four-dimensional variational data assimilation of the cloud drift wind data on tropical cyclone track numerical forecast [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 63 (3): 351-358.
- Xiao Q N, Kuo Y H, Sun J, et al. 2005. Assimilation of Doppler radar observations with a regional 3DVAR system: Impact of Doppler velocities on forecasts of a heavy rainfall case [J]. J. Appl. Meteor., 44: 768-788.
- Zapotocny T H, Menzel W P, Nelson J P, et al. 2002. An impact study of five remotely sensed and five in situ data types in the Eta Data Assimilation System [J]. Weather and Forecasting, 17: 263 - 285.
- Zhu Y Q, Gelaro R. 2008. Observation sensitivity calculations using the adjoint of the gridpoint statistical interpolation (GSI) analysis system [J]. Mon. Wea. Rev., 136: 335–350.