

四维资料同化的试验研究

李崇银 袁重光

(中国科学院大气物理所)

提 要

四维资料同化是近年来气象科学上的一个新课题,为了探讨一些基本问题,本文用正压原始方程模式进行了高度观测资料的更新和同化的初步试验研究。

试验结果表明,将测站的实测资料内插到网格点上,再用这种资料作更新或四维资料同化可以减小观测误差的影响,避免所谓排斥现象;四维资料同化方案中需要有气压场和风场间的调整。本文提出了一种简便的四维资料同化方案,用这种方案对观测资料进行同化,得到某一时刻的分析场,再用这种分析场作初值与直接用该时刻的观测场作初值分别作数值预报,其预报结果是前者比后者明显地好,进一步说明了四维同化工作有其重要意义,不但使用非定时的气象观测资料需要四维资料同化,而且在四维同化基础上可以改进数值预报。

一、引 言

气象卫星等非常规气象观测系统的出现,以及这些观测系统所获得的资料在气象业务中的使用,一方面为提高预报准确率提供了现实可能性,另一方面也自然地带来数值天气分析预报体系的变革。

在制作常规数值天气预报的时候,由于在广大海洋、高原和沙漠地区缺乏气象观测资料,尤其是高空资料,那里的“初始场”往往是很不真实的,这就是预报不准确的重要原因之一。另一方面,实际天气变化是很复杂的,在数值预报中通过模式将观测资料仅作为初值“外推”,必然丢掉天气演变过程的一些信息,同样也会造成较大的预报误差。

气象卫星等非定时观测系统可以持续不断地提供全球范围的气象资料,特别是能提供大量海洋、高原及沙漠上空的宝贵气象资料,填补了常规气象资料在空间分布上的空白区。但是,气象卫星所探测的气象要素种类有限,而且资料不是在同一时刻观测的,一般称为非定时观测资料。因此摆在人们面前的一个重要问题就是如何将这种非定时的不完全的资料同定时的但空间分布却不完备的常规资料在预报模式中综合使用,以便于提高数值预报准确率。

常规数值预报是个初值问题,但早在1958年顾震潮^[1]就曾提出,在准地转模式下,初值问题的数值天气预报与由地面天气历史演变作预报是等价的,并从理论上证明,任何一层上的温压场历史演变可以代替整个空间温压场初值。为了探讨卫星得到的不完全资料(温度)的历史演变是否可以用来产生另外的气象要素(风和地面气压)的表达式,1969年查尼(Charney)等^[2]利用二层原始方程模式作了数值试验。在查尼等试验的基础上人们

1976年11月13日收到。

进而提出了“四维资料同化”的问题。所谓“四维资料同化”,也称“资料的四维分析”,就是在一定物理条件下,确立观测和预报场(对某时刻的分析来讲,也就是预备场)间相互协调的关系,其目的是使观测资料和模式预报值之间在一定原则上进行调整,从而得到对于预报模式和持续引入的观测资料(实际天气演变)都较合理的资料分析。

通过四维资料同化,就使原来“定时”的三维分析和预报变成了“每时”的四维分析和预报,任何时刻都根据新的观测资料通过预报模式在作分析,而任何时刻又都在分析基础上作预报。这样的一种预报程序显然不同于常规数值预报过程而如图 1 所示。

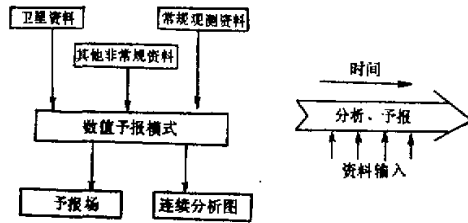


图 1 四维资料同化及其数值预报

几年来,各国的气象工作者相继对四维资料同化问题进行了试验研究。归纳起来,可以把已有的工作分为这样几类,也即是说,目前四维同化有这样几种方案。第一种称为统计同化方案。在这种方案中目前用得较多的是借用客观分析中的气象量的最优内插方法去进行资料的四维分析^{[3]~[5]}。第二种称为倾向同化方案^[6],它主要基于倾向的计算而对观测量作适当的调整。第三种称为动力同化方案,它采用反复积分的方法,由动力模式本身对引入的观测资料进行调整^{[7],[8]}。第四种称为时间坐标变换方案^{[9],[10]},即通过坐标变换把非常规资料变成新坐标下的“定时”资料,但这样的处理却使常规资料变成了新坐标下的非常规资料。直至目前,上面所提到的各种同化方案都还处于试验阶段,还没有提出一种可供数值预报业务使用的可靠方法,因此有待继续从事这方面的试验研究。

本文用简单的模式和简单的同化方法进行了四维资料同化试验,目的在于探讨四维资料同化中的一些基本问题,为进一步设计四维同化方案提供一些线索。

二、试验模式和资料

在本文试验中用正压原始方程模式:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + m \left(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial gh}{\partial x} \right) - fv &= 0 \\ \frac{\partial v}{\partial t} + m \left(u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial gh}{\partial y} \right) + fu &= 0 \\ \frac{\partial h}{\partial t} + m \left[u \frac{\partial h}{\partial x} + v \frac{\partial h}{\partial y} + h \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) \right] - hu \frac{\partial m}{\partial x} - hv \frac{\partial m}{\partial y} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

这里 u, v 分别为东西方向和南北方向的风速分量, h 为 500 毫巴等压面高度, g 为重力加速度, m 为地图投影系数。

数值计算的时候,空间差分用中央差,网格距取 540 公里;时间差分亦取中央差,时间

步长取 20 分钟,但在起步预报时用步长为 10 分钟的一步向前差和一步中央差;初始时刻的风场就用初始高度场所计算的地转风。

本文取 1975 年 4 月 24 日 20 时—28 日 20 时的探空资料作试验资料,即用这段时间内每天的两次 500 毫巴高度观测资料,但不直接用测站观测值,而是将北半球各观测站的资料经过客观和人工分析内插到网格点上,试验过程中就用这种处理过的网格点资料作为观测资料。

关于资料引入的方式,一般有连续式和间断式之分。所谓连续式就是在数值计算的每一步或者每隔很短的时间间隔就引入观测资料。所谓间断式,一般是每隔 6 小时、12 小时或 24 小时将观测资料引入预报模式。同时,资料的引入可以是全场同时引入,有人称之为常规资料同化,还可以模拟卫星运行轨道逐个格点地引入(这一般与连续资料引入相结合)。作为一种简单的引入处理,不论是资料更新还是四维同化,本文都每 12 小时在全场同时引入观测资料。

关于试验的效果,由于本文用的正压模式作试验,计算的物理量受限,为了讨论常规数值预报、资料更新和资料同化的效果,每 12 小时都计算了全半球所有格点高度预报的均方根误差,而它的计算都在该时刻的资料更新或同化前进行,即某时刻的观测资料的引入并不影响该时刻的均方根误差。四维同化主要是一个资料分析问题,要直接检验分析场在这里又缺乏客观标准,考虑到预报的好坏在一定条件下是分析场质量好坏的反映,因此,本文就用预报准确度的一种表示法——均方根误差——来说明四维同化的效果。

三、资 料 更 新

所谓“资料更新”就是用同一种气象要素的观测值代替模式预报值的过程,它是四维资料同化的一种极端情况。已有不少人用各种大气环流模式作过资料更新试验^[10-14],但在绝大部分试验中,观测资料是用预报模式作的模拟,而不是真正的观测资料。

一系列的更新试验已经表明,气象要素具有可推导性,即由某种气象要素(例如温度)的历次观测资料可以推导出与实际观测相当一致的其他气象要素(例如风和地面气压);将近极地轨道卫星所探测的温度廓线资料连续地引入预报模式可以获得全球范围中高纬度地区较好的风场资料。因此人们认为在中高纬度地区只要作高度(温度)观测就可以了,不必要观测风等气象要素。另外,这些试验还指出,如果直接引入观测资料进行更新会产生所谓排斥现象,即由于资料更新而引进模式的附加小扰动随预报时间迅速发展,造成预报误差的极大增长,似乎模式对这种资料是不可接受的,故称排斥现象。

我们每 12 小时引入一次高度观测的格点值去代替该时刻的高度预报值,即作了高度资料更新的试验。进行高度更新与未进行高度更新(常规预报)情况下计算的均方根高度误差随预报时间的变化如图 2 所示。可以看到,在常规预报情况下(实线),均方根高度预报误差随时间不断增长,而每 12 小时进行高度更新之后(虚线),均方根高度误差不再随时间迅速增长,虽然时高时低;但总是比未进行更新时的均方根误差小得多。同已有的试验相一致,这个试验清楚地表明,在预报过程中即使使用简单的方法引入高度观测资料也可起到减少预报误差的作用。同时,试验还告诉我们,不用模拟资料而用实际观测资料进行

更新并不一定出现排斥现象,只须将测站资料(空间)内插到网格点上即可。因此可以认为将实际观测资料(空间)内插到网格点上是很需要的,它可以减少观测误差对预报模式的冲击,避免排斥现象的发生。

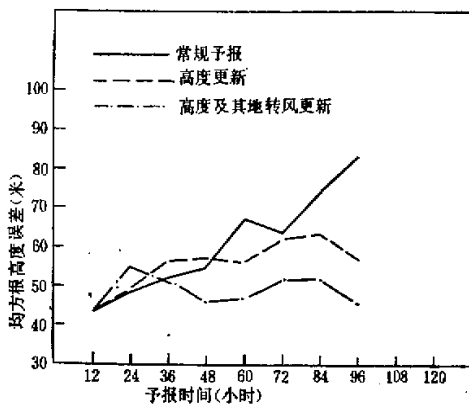


图2 资料更新试验与常规预报的比较

在上述高度更新试验的基础上,还进行了另一个试验,就是在高度更新后,即用高度观测资料算出地转风,再用这种地转风代替该时刻风场的预报值(这并不同于以此时刻的观测高度场作初始场而重新起步预报,因为是用时间中央差,这时已有前一时刻的高度和风的预报值)。这个试验的结果如图中点划线所示。与仅作高度更新的结果相比较可以清楚地看出,这个试验的结果要比单作高度更新好得多,48小时后其均方根高度误差比单更新高度时要小约10米左右。这是因为引入了由更新高度场计算的地转风,在模式的继续积分过程中使得气压场与风场更加协调了。否则,高度观测场和预报场之间总会产生不协调,出现非地转风。根据适应理论,在中高纬度地区,大型大气运动有维持准地转的特性,每当有非地转风出现而破坏准地转平衡时,气压场和风场就要相互调整,建立新的准地转平衡,即每更新一次高度就可能给模式一次冲击,这种冲击必然影响更新效果甚至造成不稳定的迅速发展。因此,在更新(同化亦然)过程中考虑气压场和风场间的适当调整是适宜的。更新高度的同时再用地转风去更新风场是一种简单考虑调整的方法。

本文未作中高纬度地区和低纬度地区的细致比较,但计算过程中发现,高度更新之后中高纬度地区的预报环流较低纬度地区的预报环流要更接近实况一些,再考虑到热带地区天气演变过程中流场变化比较突出这一事实,似乎可以认为在热带地区仅有高度(温度)观测还是不够的。从另一个角度来看,更新高度并用此高度场计算的地转风去更新风场可以得到比较好的效果似乎又给我们一个启示,即在中高纬度地区有了准确的高度(温度)观测,通过一定方法将这种观测资料不断引入模式可以导出比较合理的风场,因此从数值预报角度讲,在这些地区可以不必直接测风,只要有较准确的高度(温度)观测就可以了。

四、四维资料同化

正如前面已经指出的,四维资料同化就是在人们熟悉的三维分析的同时考虑资料的历史变化,即把不同时刻的观测资料引入模式并参加资料分析。因此,将(三维)客观分析中的一些方法推广到四维资料同化就是很自然的,尤其是对于统计同化方案。

在客观分析中,如果在 i 点有高度观测资料,则格点 0 上的高度分析值可表示成:

$$Z_{0i} = Z_0^{(F)} + w_i(Z_i^{(0)} - Z_i^{(F)}) \quad (2)$$

式中 $Z_0^{(F)}$ 和 $Z_i^{(F)}$ 分别为 0 点和 i 点的高度预备值, $Z_i^{(0)}$ 为 i 点的高度观测值, w_i 为 i 点的权重因子。假定权重 w_i 仅与 i 点和 0 点间的距离 r_i 有关,并取

$$w_i = \begin{cases} \frac{R^2 - r_i^2}{R^2 + r_i^2} & \text{若 } r_i \leq R \\ 0 & \text{若 } r_i > R \end{cases} \quad (3)$$

这里 R 是 $w = 0$ 的距离,在本文的同化试验中取 $R = 2\sqrt{2}\Delta S$, ΔS 为差分计算的格距。

另一种情况,如果在 i 点还有侧风记录,则 0 点的高度修正值可以为

$$Z'_{0i} = Z_0^{(F)} - \left[Z_i^{(0)} + \frac{f}{g} (v_i^{(0)}\Delta x - u_i^{(0)}\Delta y) \right] \quad (4)$$

其中 $u_i^{(0)}$ 和 $v_i^{(0)}$ 为观测风的速度分量。

近来,气象资料的来源增多,除常规观测资料外,既可以从近极地轨道卫星遥测的温度廓线推算出各等压面的高度,而且由地球同步卫星和飞机报告还可以获得大量的侧风资料。为探讨在模式中充分使用这些资料,我们试将上述客观分析中的概念引用到四维资料同化中来。考虑到分析场既能保持观测的一些特征又能尽量与预报模式协调,我们简单地假设 0 点的高度分析 $Z_0^{(A)}$ 由三部分组成,其一为该点的高度观测,它自然反映观测的特性;第二部分是由周围 12 个点的预备场误差 $(Z_i^{(0)} - Z_i^{(F)})$ 按(2)式所求得的高度值,它对观测进行了一定调整,使得分析场可以部分地与预报模式协调;第三部分是由周围 12 个点的观测风根据(4)式的修正量计算的高度值,它可以使某一点的分析值与周围各点的观测值相协调。即

$$\begin{aligned} Z_0^{(A)} = \frac{1}{3} (Z_0 + Z_{0i} + Z'_{0i}) = \frac{1}{3} \left\{ Z_0^{(F)} + [Z_0^{(F)} + w_i(Z_i^{(0)} - Z_i^{(F)})] \right. \\ \left. + w_i \left[Z_i^{(0)} + \frac{f}{g} (v_i^{(0)}\Delta S - u_i^{(0)}\Delta S) \right] \right\} \quad (5) \end{aligned}$$

我们称这种方案为资料综合同化方案。

本文试验中,没有用实际测风而是用高度观测值所计算的地转风。每预报 12 小时我们即输入 500 毫巴的高度观测值并按(5)式进行资料同化得到分析场,用这种包含新的观测资料的分析代替该时刻的高度预报值。而且与上节中的第二种更新试验一样,在用新的高度分析代替高度预报的同时,又用分析高度场的地转风代替该时刻的预报风场。进行了这些处理之后再继续向前作预报。图 3 中虚线是这种同化方案所得到的 500 毫巴高度预报的均方根误差随预报时间的变化。同常规预报和更新试验的结果比较可以看到,经过四维资料同化,36 小时后 500 毫巴高度预报的均方根误差不但比常规预报时低,而

且也比资料更新时小一些。

如果将(5)式中 $Z_0^{(A)}$ 的三部分取不同的权重, 即令

$$Z_0^{(A)} = P_1 Z_0^{(0)} + P_2 Z_{01} + P_3 Z_{02} \quad (6)$$

而试验表明, 取 $P_1 = 0.325$, $P_2 = 0.50$, $P_3 = 0.175$ 结果比较好, 如图 3 中点线所示。很显然, 选取这样的权重后效果比等权重时又有所改进。

另外, 用同样资料还作了高度最优内插的同化试验。即令(四维资料)分析场与预报场和观测场有如下关系:

$$Z_0^{(A)} = Z_0^{(F)} + \sum_{i=1}^N P_i (Z_i^{(0)} - Z_i^{(F)}) \quad (7)$$

这里 N 为参加 0 点同化分析的观测资料的格点数, P_i 为权重因子, 其他符号同前。

(7) 式右端第二项反映了预报和观测间的统计特性。根据分析场均方差最小的条件, 可以得到 N 个方程组成的方程组, 解这个方程组便可得 $P_i (i = 1, \dots, N)$, 从而也就可以得到 $Z_0^{(A)}$ 。

每 12 小时即输入观测资料进行最优内插同化试验, 其结果亦给在图 3 中。可以看到, 最优内插同化的效果并不及资料综合同化好。

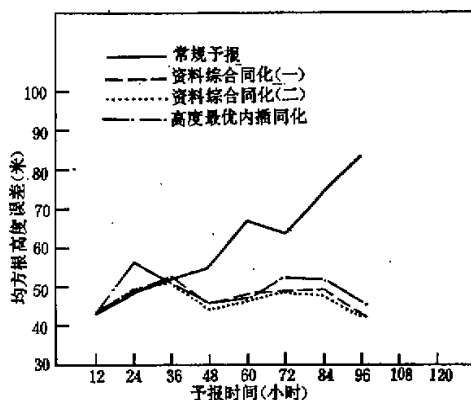


图 3 四维资料同化试验与常规预报的比较

为了进一步说明四维同化的效果, 我们分别用 75 年 4 月 25 日 20 时的观测场和同化场作初始场、用本文所用的模式按同样的步骤向前作了 36 小时预报, 其均方根高度误差随预报时间的变化如图 4 所示, 图中实线是用观测场作初始场的预报效果, 虚线是用该时刻的四维同化场(用资料综合同化方案进行了二次四维资料分析)作初始场的预报效果。很显然, 用四维同化得到的分析场作初始场比直接用观测资料的客观分析场作初始场要好, 因为 12 小时预报的均方根高度误差前者比后者小 5 米多。试验清楚地说明了四维资料同化对于数值预报有其重要意义。因为在四维资料同化过程中, 一方面通过预报模式对实际观测资料进行了调整, 所得到的分析与预报模式比较协调; 另一方面, 由于引入了几个时刻的观测资料, 部分地保持了天气过程的历史演变规律。这两个特点就使得四维同化可以得到对预报来讲既合理又可靠的分析场, 用这种分析场作初始场当然也就可以

得到比较准确的数值预报。

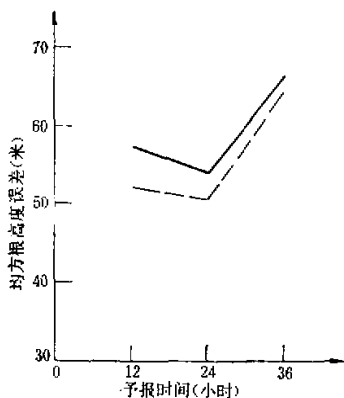


图4 观测场为初始场与同化场为初始场预报结果的比较

五、结 束 语

本文用简单的正压原始方程模式探讨了四维资料同化中的一些基本问题,通过试验和上述分析,可以得到如下几点看法:

1. 不论是资料更新还是四维资料同化,其高度预报的均方根误差都基本上在某一固定值附近摆动,这个固定值大致就是模式的预报精度。因此,为了建立较好的四维资料同化系统,需要设计准确的短期预报模式。

2. 用一定方法将测站的观测资料内插到网格点上是有用的,它可以减少观测误差的影响。引入经过这样处理的观测资料进行资料更新或四维同化可以避免出现一些文章中提到的所谓排斥现象。

3. 本文两种更新试验的比较可以看到,在四维资料同化系统中应考虑气压场和风场间的调整。因为新的观测资料的引入往往会引起观测资料与预报值间的不协调、激发出不稳定的高频波动,必须加进适当的调整处理,以便气压场和风场相适应。

4. 为便于实际使用,四维同化方案应力求简便,从本文所作的试验研究来看,综合同化方案似乎是可取的,它所需计算时间比最优内插同化方案少,效果又比较好。

5. 由于四维同化过程既可以使用不同时刻不同类型的观测资料又可以保证观测资料与预报模式协调,资料的持续引入还部分地保留了实际天气变化的历史规律。因此,四维同化可以得到较合理较可靠的分析场,也就可以得到较准确的数值天气预报。

四维资料同化是一个新的课题,虽然有不少人在从事这方面的研究工作,但都还处于试验阶段,不少问题需要继续深入研究。只在部分地区引入观测资料的情况如何、观测误差的影响等等问题本文均未予以讨论,尚待进一步试验研究。

承叶笃正、曾庆存同志对本文提出宝贵意见,特此致谢!

参 考 资 料

- [1] 顾震潮, 作为初值问题的天气形势数值预报与由地面天气历史演变作预报的等值性, *气象学报*, 1958, 29, pp. 93—98.
- [23] J. Charney, M. Halem, and R. Jastrow, Use of incomplete historical data to infer the present state of the atmosphere, *J. Atmos. Sci.*, 1969, 26, pp. 1160—1163.
- [3] L. Bengtsson, and N. Gustavsson, An experiment in the assimilation of data in dynamical analysis, *Tellus*, 1971, 23, 328—336.
- [4] L. Bengtsson and N. Gustavsson, Assimilation of non-synoptic observations, *Tellus*, 1972, 24, pp. 383—398.
- [5] C. M. Hayden, Experiments in four-dimensional assimilation of NIMBUS 4 SIRS data, *J. Appl. Meteor.*, 1973, 12, pp. 425—432.
- [6] Y. Sasaki, Proposed inclusion of time variation terms observational and theoretical in numerical variational abjective analysis, *J. Meteor. Soc. Japan*, 1969, 47, pp. 115—124.
- [7] P. Morel, G. Lefevre and G. Rabreav, On initialization and non-synoptic data assimilation, *Tellus*, 1971, 23, pp. 197—206.
- [8] P. Morel, G. Lefevre, G. Rabreav and O. Talagrand, Dynamic approach to meteorological data assimilation, *Tellus*, 1974, 26, pp. 334—343.
- [9] J. Holmström, On four-dimensional data assimilation, *Tellus*, 1973, 25, p. 525.
- [10] I. Halberstam, Asynoptic Meteorological Data assimilation by means of a time coordinate transformation, *Mon. Wea. Rev.*, 1975, 103, pp. 61—65.
- [11] R. Jastrow, and M. Halem, Simulation studies related to GARP, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 1970, 51, pp. 490—513.
- [12] R. Jastrow and M. Halem, Simulation studies and the design first GARP global experiment, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 1973, 54, pp. 13—21.
- [13] D. L. Williamson, and A. Kasahara, Adaptation of meteorological variables forced by updating, *J. Atmos. Sci.*, 1971, 28, pp. 1313—1324.
- [14] A. Kasahara, and D. L. Williamson, Evaluation of tropical wind and reference pressure measurements: numerical experiments for observing systems, *Tellus*, 1972, 24, pp. 100—115.