

## 第二讲 四维资料同化业务系统

屠伟铭

(国家气象中心)

### 提 要

该文简单地叙述了国家气象中心四维资料同化业务系统中的各子系统，即资料处理、客观分析、初值化和模式预报子系统。该系统能较好地为预报模式提供初始条件。并对四维资料同化业务系统中的分析质量进行了评述。

### 一、引言

全球观测系统的改进，主要发生在70年代的中后期。突出表现在从极轨卫星得到垂直温度廓线等资料，以及从地球静止卫星得到云迹风资料。1979年的全球大气试验，对于开展国际合作，共同发展同化系统，以便在业务预报中利用这些新资料，起了适时的必要的推动作用。60年代后期及70年代发表的数值天气预报研究结果表明，采用高分辨率的模式及更精确的参数化方法，来描述物理过程（如辐射、海-气及地-气相互作用等），有可能进一步改进数值天气预报。但这在引进大型计算机甚至于巨型计算机之前是不可能做到的。直至欧洲中期天气预报中心在1978年引进CRAY-1计算机，美国国家气象中心在1983年引进CYBER-205计算机后，才有可能去进一步探讨利用卫星观测资料和现代数值天气预报的研究成果。在此基础上，发达国家的气象中心纷纷建立起全球四维资料同化业务系统，比较显著地提高了业务数值天气预报的质量。我国国家气象中心也于1991年在CYBER-992计算机上建立了以6小时为间隔的全球四维资料同化业务系统，为中期数值天气预报模式提供很好的初始条件。

### 二、资料同化方法

我国国家气象中心的四维资料同化业务系统，包括观测资料的预处理、客观分析、初值化和模式预报。现使用6小时间隔的同化方法，即每次6小时的模式预报结果，作为初估场供下次分析使用，而分析又为模式提供初始条件，这样每天4次不断运行（见图1）。

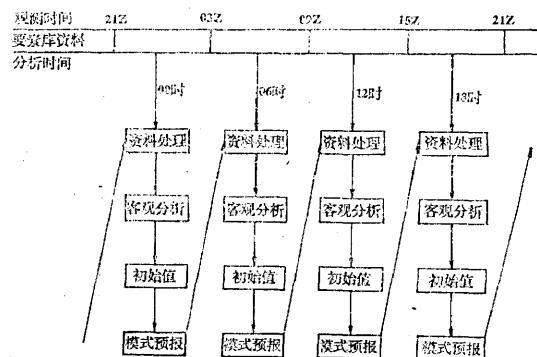


图1 6小时周期四维同化方案流程图

现将该系统中各子系统简单叙述如下：

#### 1. 观测资料的预处理

目前所使用的观测资料，主要是从全球电传通信系统得到，每天4次分别在00Z（世界时，下同）、06Z、12Z和18Z的前后3小时内收集资料。它们分别是地面/船舶报告、

无线电探空、气球测风、飞机报告、卫星测风、卫星测厚、漂浮站和高空人造站。一般来说，常规报告的数量不少于其它国家，但非常规报告如飞机报告和卫星探测报告的数量不及欧美等国<sup>(1)</sup>。附表列出了1990年3月3日得到的报告数。

附表 1990年3月3日的报告数

项目	00Z	06Z	12Z	18Z	小计
地面/船舶	7157	7160	7240	6966	28523
探空A部	837	228	799	255	2119
探空B部	458	18	412	7	895
探空C部	691	43	548	75	1267
探空D部	401	9	355	8	773
飞机报告	688	960	855	1013	3516
卫星测风	3708	1542	3399	1254	9903
卫星测厚	1130	1223	1137	1287	4777
漂浮站	367	268	380	384	1399
高空人造站	123	0	0	0	123
总计	15470	11451	15125	11249	53295

从资料要素库中读取的全球各类资料格式化后，首先进行气候值检查和垂直一致性检查，后者包括 $\ln P$ 线性内插检查、温度垂直递减率检查和逆温层结检查、静力学检查、仪器结冰检查、风的垂直切变检查。然后进行非标准层资料处理、多余资料的剔除和间接观测资料的计算<sup>(2)</sup>。最后，计算观测增量（在测站，观测值与初估值之差），并对它们进行极值检查和水平一致性检查（仅对高度和 $u$ 、 $v$ 风分量，而相对湿度不进行水平一致性检查）<sup>(3)</sup>。通过上述资料的质量控制，订正和删除错误资料。

## 2. 客观分析

客观分析方案，采用当前世界上普遍使用的三维多变量最优插值方法（相对湿度分析是单变量）<sup>(4)</sup>，它允许同时使用各种类型、具有不同观测误差的资料。由观测增量和其相应的权重系数，可求得分析格点上的 $u$ 和 $v$ 的风分量、位势高度及相对湿度的分析增量和分析误差。在中、高纬地区，位势高度分析增量和风分量的分析增量，受近似的

地转关系约束。分析格点是采用等面积高斯格点，即分析格点是在模式的高斯纬圈上（对于三角截断42个波，全球的高斯纬圈数为64），在极地附近的高斯纬圈上有等距的4个分析格点，而在赤道附近的高斯纬圈上有128个分析格点，与模式一致。为了提供给模式使用，首先将分析增量在高斯纬圈上线性插值到模式格点上（128个）。另外，将它线性插值到 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ 等经纬度格点，并与初估场相加得到分析值，供气象业务和科研工作使用。

## 3. 初值化

为了避免对地形进行特殊处理，全球谱预报模式采用 $\sigma$ 坐标系统。由于目前的客观分析是在12层标准等压面（1000—50hPa）上进行的，所以必须进行垂直插值，并将分析变量转换为预报模式的物理量。在水平方向，预报模式以球谐函数表示场，但分析是在格点空间进行，所以需要进行格谱转换，将增量场加到初估场上，形成模式层上的分析系数，供初值化使用。

初值化能够有效地控制客观分析中质量场和运动场之间的不平衡，以免造成虚假的高频重力波振荡对预报的损害。这些高频振荡，比实际大气中观测到的重力波振幅大得多。非线性正规模初值化方法的主要原理，是用模式大气中自由振荡的正规模来表示分析场，然后修正快速移动的重力模的系数，使其初始时间倾向为零。要修正的重力波是在前5个垂直模中，通过两次非线性迭代，得到的系统是动力平衡的，物理场如散度和垂直运动场是平滑的和有气象意义的<sup>(5)</sup>。气象噪音在中高纬地区是较小的，所以它在分析场和初值化场之间通常是比较小的，但是，在热带地区的散度和地面气压除外。由于初值化是用模式的动力框架和物理过程来估计正规模的倾向，所以初值化的结果依赖于模式，这就是初值化场与分析场差别的主要所在。

#### 4. 预报模式

在同化系统中，使用的预报模式是国家气象中心全球中期数值天气预报谱模式<sup>[6]</sup>，即9层原始方程谱模式，三角截断波数为42，故简称为 T<sub>42</sub>(L<sub>9</sub>)。垂直坐标是σ坐标系，它利用初值化场计算6小时预报值，为下一次分析提供初估场，从而能把过去的观测资料更新成分析时刻的信息，并将所有资料同化到代表大气真实运动的三维多变量分析场中。

模式变量的水平表示采用谱方法，其基本原理是用一组数学函数（球谐函数）来表示一个场，而不像格点方法那样用离散的格点值来表示场。其主要优点是不存在空间截断误差，这就除去了扰动的位相误差；极点可作为一点处理，避免了对极点的特殊考虑；其次提高了计算效率。

预报模式的方程组，为涡度方程、散度方程、热力学方程、连续方程、静力状态方程和水汽方程。模式方程组的运算采用垂直有限差分、水平波谱技术和半隐式时间积分方案，时间步长为半小时。其主要物理过程除辐射仍采用美国地球流体力学实验室的方案外，其它的都采用欧洲中期天气预报中心的方案。包括水汽的凝结和蒸发，热量、动量和水汽的湍流输送以及地面行星边界层的作用等<sup>[7]</sup>。方案中，质量、动量、位温、水汽、角动量和总能量是守恒的。地形场是根据 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 等经、纬度资料谱展后获得，最高地形为5796m。

预报是在模式的σ面上以谱的形式计算的，对于一般的天气学分析，使用很不方便。另外，为分析提供的6小时预报值，需要在标准等压面上，所以后处理是将预报场从σ面垂直插值到标准等压面，然后进行谱格转换，得到 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ 等经、纬度的格点值，为下一次分析提供高度、u和v风分量及相对湿度等6小时预报值。

#### 三、资料同化的质量

四维资料同化的主要目的，是为国家气象中心的业务数值天气预报模式提供一个好的初始场。即此系统使用了所有合适的各类观测资料和6小时预报值，给出数值形式的全球分析场。要使分析尽可能的精确，就必须以下述的两种方式，并从现有的观测资料中补充信息：（1）从该分析时刻以前的观测资料中提取信息。（2）应用大气运动的可能结构及尺度方面的知识，以及大气中经常观测到的各种不同的要素场（质量、风、湿度）之间相互平衡的知识。在资料同化方案中，上述的两种方式是借助于大气模式来实现的，所以国际上各气象中心的业务资料同化方案中都使用最新、最好的模式。

所谓资料同化的质量，实际上是系统中各个子系统质量的综合，而最后表现在分析质量上。目前评价分析质量有分析的稳定性、对观测资料的拟合程度、对预报的影响以及与人工分析比较等方面<sup>[8]</sup>。

因为无线电探空报告能够提供质量较好和来报频率较高的观测资料，所以世界各国广泛采用它作为评价分析质量的依据，计算平均误差、均方根误差、倾向相关和距平相关等。现选取北半球335个无线电探空站的观测资料作为参照来评价客观分析。在北美、欧洲和亚洲3个区域分别选择97个、85个和153个无线电探空站，其中我国有78个站。并对3个分析层次（250、500、850hPa）的高度场和风场分别进行统计检验。

图2给出1990年4月—1991年3月的高度(a)和矢量风(b)的分析均方根误差月平均曲线。由此图可见，在这一年中，高度和矢量风分析的均方根误差的月平均曲线变化相当平稳，250、500和850hPa3层高度的分析均方根误差分别在23、14和10gpm上下较小范围内波动。这3个层次的矢量风的分析均方根误差都在 $5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 左右变化。

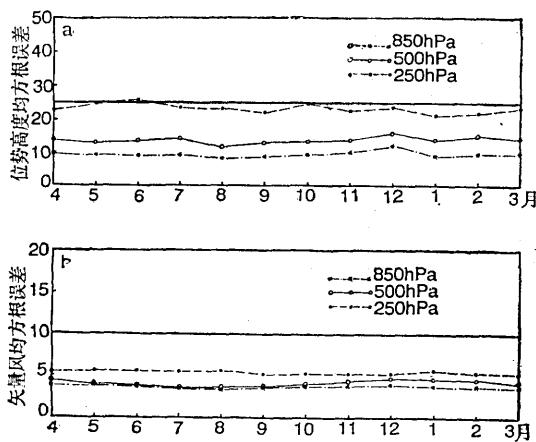


图2 1990年4月—1991年3月高度(a)和矢量风(b)分析均方根误差月平均曲线

另外，还可见到有一较为稳定的季节变化的特点，在中低层较明显。即在4—9月的暖季分析误差幅度比10月—3月的冷季略低一些。可能是由于冷季的天气系统强且移动快，为客观分析提供的预报值误差较大一些所致。总之，它反映了资料同化系统有较好的稳定性。

图3是1990年4月—1991年3月高度(a)和矢量风(b)分析的相关系数数月平均曲线。由此图可见，在850hPa高度分析的相关超过0.95，矢量风分析的相关在0.90左右。在500和250hPa的中、高层评分更好。这表明在温带的亚欧和北美大陆地区，

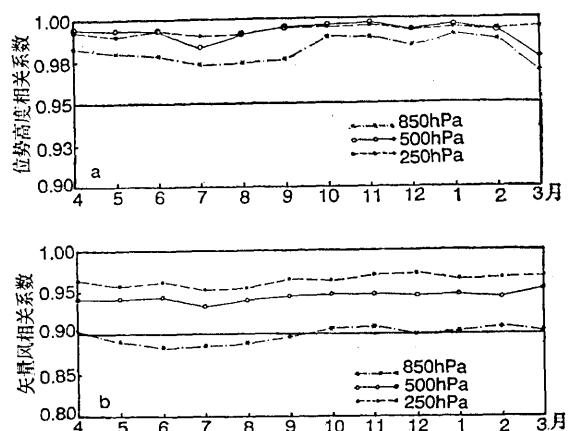


图3 1990年4月—1991年3月高度(a)和矢量风(b)分析相关系数月平均曲线

分析对无线电探空的观测资料稳定且有相当高的拟合程度。

图4是1991年10月19日12Z—25日12Z7次5天预报的平均统计检验。分别表示了每天4次分析—预报同化系统提供初值在CYBER-992计算机上作5天全球预报(实线)和每天2次分析—预报循环系统提供初值在M-360计算机上作5天北半球预报(虚线)的平行试验期间，北半球500hPa高度预报对分析的平均误差、均方根误差、倾向相关和距平相关。由图可见，每天4次的分析—预报同化系统的统计检验结果，优于每天2次的分析—预报循环系统，其中第5天预报的距平相关系数超过0.60。目前，国家气象中心同世界上大多数先进的气象中心一样采用每天4次的分析—预报同化系统，并进行全球中期数值天气预报。

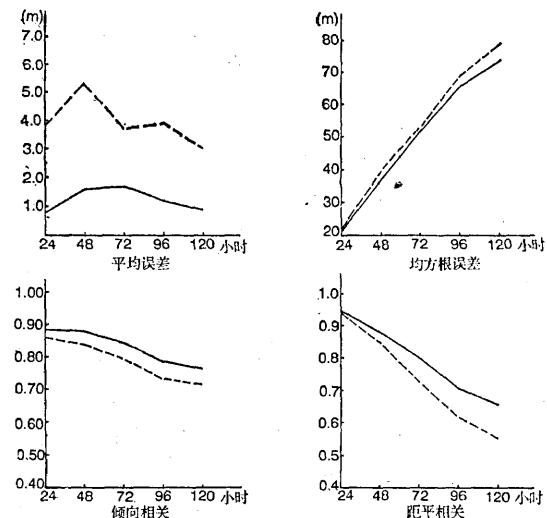


图4 1991年10月19日12Z—25日12Z7次5天预报平均统计检验

由于资料库的改善，特别是非常规观测资料如卫星观测，增加了数量和改进了质量，另外，由于最优插值分析能允许同时使用不同类型的资料，所以不仅在资料密集地区分析很精确，而且在海洋上资料来源增多，以及含有较复杂的物理过程的预报模式较准确的6小时预报值作为初估场，使洋面的广

大地区也得到了可靠的分析。有关调查表明，在资料稠密地区， $T_{42}$  分析与人工分析和欧洲中期天气预报中心的分析相似。在洋面上北半球500hPa高度分析中， $T_{42}$  分析比手工分析具有更多优越性，接近于欧洲中期天气预报中心的分析结果。

南半球的常规资料数量远不如北半球，所以卫星观测资料占有较大比重，由于这些资料的有效利用，从而提高了南半球区域的分析精度，使分析结果有一定的使用价值。但必须承认，卫星观测资料的精度不及无线电探空观测资料，其观测误差较大。另外，由于我国计算机资源的限制，预报模式的分辨率较低，物理过程还不够细致，所以对南半球的分析影响较大，分析精度不及北半球。

#### 四、结语

用四维资料同化系统给预报模式提供初始条件，有以下优点：

1. 用含有复杂物理过程的大气谱预报模式作为同化模式，可为下一次客观分析提供最精确的初估场，这一点在时空分布上资料缺少的地区尤为重要。同样有利于保证观测资料质量控制的精度。

2. 将预报模式提供的初估场与多变量最优插值分析方法结合使用，可以有效地保证风压场的平衡，以确保由于初值化引起的变化足够小，从而保留更多的观测信息。

3. 最优插值方法为处理不同类型的观测资料，提供了一个严格的统计分析方法。

4. 多变量最优插值分析方法，可用一个观测变量来分析、更新另一个变量。如用观测的高度来分析、更新风变量，或反之。

5. 使用预报提供的初估场的分析，又

反馈给预报，即一个较好的预报场可通过初估场得到一个较好的分析场，从而又得到较好的预报场。

总之，由四维资料同化系统所得到的分析场，精确地描述了大气、大气边界层、边界层互相作用等可能的状态，并为预报模式提供最好的初始条件。

不久，国家气象中心的计算机能力和资源将有改进，这有助于提高预报模式的分辨率以及采用更复杂的物理过程和更先进的分析方案及初值化方案，同时探索和扩大观测资料的来源，将使四维资料同化系统更好地为预报模式提供初始条件，从而提高预报精度和延长预报时效。

#### 参考文献

- (1) 陈卫红、吕芸芸，我国气象资料现状调查，中期数值天气预报研究成果汇编(一)，11—23，气象出版社，1990.2。
- (2) 屠伟铭、陶士伟，全球气象资料预处理和质量控制方案的实施，同(1)38—45，1990.2。
- (3) 陶士伟、陈卫红、屠伟铭、郭小刚，中期数值天气预报系统中观测资料的质量控制，中期数值天气预报研究成果汇编(三)，277—292，1991。
- (4) 屠伟铭、张跃堂，全球气象资料四维同化客观分析系统，同(1)，24—37，1990.2。
- (5) 沈元芳、张展、王诗文，绝热非线性正規模初值化方案及其试验结果，同(1)，46—57，1990.2。
- (6) 皇甫雪官，中期数值预报绝热谱模式的数值试验，同(1)，107—138，1990.2。
- (7) 乌元庆等，中期数值预报试验系统中物理过程参数化的引进与开发，中期数值天气预报研究成果汇编(二)，1—26，1990。
- (8) 李建军，全球资料同化分析质量评价，数值预报产品应用指南(第一册)，94—99，气象出版社，1992年。