

气象卫星资料同化的科学问题与前景^{* 1}

薛纪善

XUE Jishan

中国气象科学研究院灾害性天气国家重点实验室

State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China

2009-07-21 收稿, 2009-08-26 改回.

Xue Jishan. 2009. Scientific issues and perspective of assimilation of meteorological satellite data. *Acta Meteorologica Sinica*, 67 (6): 903–911

Abstract The main features of the observations by meteorological satellites and related scientific issues in terms of data assimilation in numerical weather prediction are analyzed in comparison with the in situ data. The raw observations of the satellite-borne instruments are electromagnetic radiances which may not be digested directly by the NWP (Numerical Weather Prediction) models. The measured radiances are affected by the state of the whole column of the atmosphere rather than an individual level, so that the sensitive height and the equivalent vertical resolution of the satellite observations are crucial. Different from most conventional observations, the measurements from the satellite are not bias-free. In order to assimilate the satellite data, it is fundamental to convert the model predictands to the electromagnetic radiances of specific channels sensed by the satellite-borne instruments or conversely. The former, which is so called direct assimilation, needs complicated observational operators, but in the latter, known as indirect assimilation, the retrieval must be included as one step of the data preprocessing. The choice of direct or indirect strategies depends on the capability of the data assimilation system in dealing with the complicated observations and is crucial for the effects of the satellite data usage in NWP. Following the general discussions, the achievements in assimilation of five main categories of satellite data, i. e. the satellite soundings, satellite derived atmospheric motion vectors, space based scatterometers, precipitation affected radiances and GPS radio occultation data are reviewed with the stress on the discussion of the further improvements. The progresses of satellite data assimilation in China are also reviewed followed by concerns for the near future developments.

Key words Meteorological satellite, Data assimilation, Numerical weather prediction

摘 要 从数值天气预报资料同化的角度,分析了气象卫星观测与常规气象观测的不同特点形成了卫星资料同化的特殊科学问题。由于各类星载遥感仪器所观测到的是一定波长的电磁辐射,不能像传统的直接观测资料一样被预报模式直接应用。又由于卫星观测对象是整个大气层,而不是特定高度的大气,因此确定卫星观测影响的高度和它的潜在垂直分辨率成为一个关键问题。卫星观测还可能存在着系统性的偏差,这与直接观测的误差互相独立也有很大区别。资料同化通常建立在模式预报(即背景信息)与观测量的比较的基础上,为了实现同化,需要将模式的基本大气变量转换成星载仪器所获得的特定波长的电磁波特征量,或者将观测到的电磁辐射特征量反算成大气的特征量。前者需要引入复杂的观测算子,后者则将复杂的反演过程交给了前处理阶段。这就形成了直接与间接同化卫星资料的两种不同策略,策略的选择取决于同化系统处理复杂观测资料的能力,对同化效果有决定性的影响。逐个分析了目前用于数值预报的5种卫星观测资料,即星载大气垂直探测器资料、大气运动矢量资料、散射仪海面风资料、卫星观测的云与降水信息资料与GPS掩星观测资料的同化的进展与有待解决的主要问题,概述了中国近年在大气垂直探测器等卫星资料同化中的研究进展及其业务应用的效果,并提出了今后需要予以特别关注的研究方向。

关键词 气象卫星, 资料同化, 数值预报

中图法分类号 P405

^{*} 资助课题:国家重点基础研究发展计划项目“我国南方致洪暴雨监测与预测的理论和方法研究”课题(2004CB418306)。

作者简介:薛纪善,主要从事数值预报模式与气象资料四维同化方法的研究。E-mail:jsxue@cma.gov.cn

1 引言

气象卫星与数值天气预报是近半个多世纪以来气象领域两项最引人瞩目的科学技术成就,前者使人类“看到”了我们赖以生存的地球大气的全貌,后者则把可信的天气预报延伸到一周以上,并为天气和气候变化的研究提供了数值模拟的研究平台。两者的发展是互相促进的,气象卫星使数值预报从多年来缺乏观测资料的困境中摆脱出来,而逼真的大气数值模式又成为气象卫星研发的仿真平台,并为大量卫星产品的生成提供了背景场,它们的密切联系在近 20 年表现得更加突出 (Shapiro, et al, 2004)。

数值预报属于微分方程的初值问题,初始场的正确性对预报有决定性的影响。数值预报的资料同化实质上是利用观测资料不断修正模式的预报,产生更接近实况的模式大气状态的过程,它为下一时刻的预报提供更准确的初始场。数值预报发展的早期,能利用的观测资料完全来源于人工的地面(船舶)与探空观测,海洋与陆上人迹罕到的地区缺乏观测资料是长期以来数值预报的最主要的误差来源之

一。20 世纪 60 年代开始的气象卫星观测打破了气象观测仅局限在有人类活动地区的局面,为数值预报的改进带来了新的机遇,这对于全球预报特别重要。但受到当时卫星观测的精度与数值预报中的资料同化方法的发展水平的限制,在相当长的时间里,气象卫星观测资料并没有对数值预报产生明显的影响。20 世纪 90 年代 Eyer 率先在变分资料同化的框架内,对星载大气垂直探测器 (satellite soundings, 以下简称星载探空) 的资料进行了直接同化,使卫星资料在数值预报中的应用进入一个新的时期 (Eyer, et al, 1993, 1997),至今一些国家的数值预报系统所使用的卫星观测的数量已经超过资料总量的 90%,根据国际上主要业务中心的统计,它们对同化的贡献也超过了常规探空与地面气象观测 (参见 THORPEX International Science Plan, WMO TD-No1246)。图 1 是欧洲中期预报中心的业务资料同化系统近十几年同化的各类卫星观测仪器,右侧图标给出卫星的名称 (引自 Kelly, et al, 2007),图中最近两年的数字是计划数字,显示出进入新世纪以来卫星资料在数值预报中应用的急剧增长。图 2 是欧洲中期预报中心对卫星资料对全球中期数值预报质量 (以

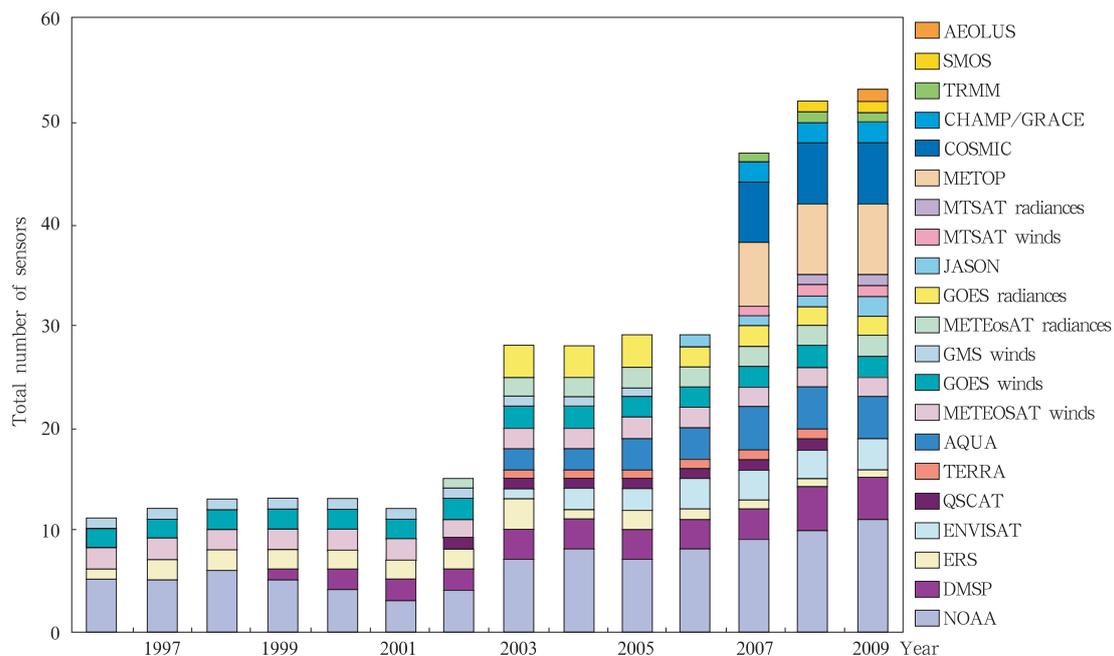


图 1 欧洲中期预报中心业务资料同化所使用的卫星传感器的数量

Fig. 1 Number of satellite-borne sensors used by

ECMWF operational data assimilation (from Kelly, et al, 2007)

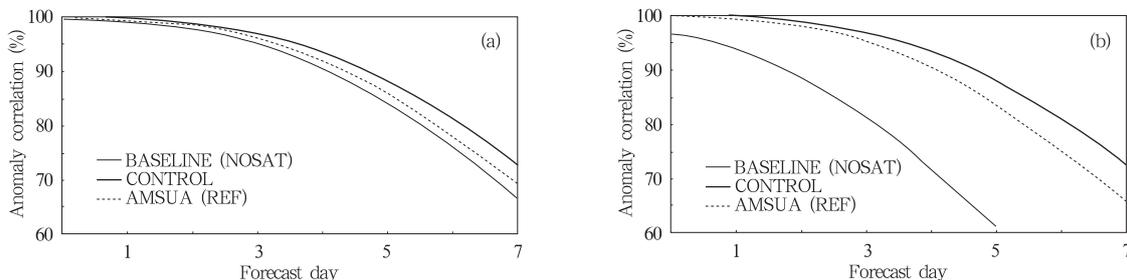


图2 卫星观测对500 hPa预报的影响(a. 北半球,b. 南半球)

Fig. 2 Impact of satellite observation on prediction of 500 hPa height (from Kelly, et al, 2007)

(a. Northern hemisphere, b. Southern hemisphere)

500 hPa 高度预报与实况的异常相关系数为标准)的影响的统计结果(Kelly, et al, 2007)。图中细实线(BASELINE)是仅使用常规观测资料(包括探空、地面、船舶、浮标、飞机与风廓线仪)的预报,粗实线(CONTROL)是常规观测再增加卫星观测风的预报,而虚线(AMSUA)是常规观测加上卫星的 AMSU 资料。此图显示如果不同化卫星资料,南半球的可靠预报时效将减短 2 天,北半球将减短近 1 天。其他不同角度的试验结果也都表明卫星资料同化带来的数值预报初始场的改进是近十几年来全球数值预报质量快速提高的最主要原因之一。

目前数值天气预报系统同化的气象卫星资料主要有 5 类,它们是星载垂直探测器(下面简称星载探空仪)资料、卫星导得的大气运动矢量、星载散射仪测得的海面风场、各类卫星仪器测得的云与降水的信息以及利用 GPS 信号进行的掩星观测资料(Eyer, 2007)。除此之外卫星对大气成分与地(海、冰)表的观测也在数值预报与气候数值模拟中有重要应用,但本文将不涉及这些观测资料的同化。数值预报对卫星资料的同化能力与成效取决于卫星观测与资料处理技术和数值预报中资料同化理论与方法的发展两个方面。尽管卫星资料的同化已经取得巨大的成就并对数值预报的改进做出了明显的贡献,但由于问题的复杂性与现行同化系统的局限,目前可被同化系统所使用的卫星观测资料大约只占现有卫星观测所产生的资料的 5% 左右,其原因涉及卫星资料本身的处理与质量控制、同化系统的局限(如目前的观测算子还不能精确模拟云中的辐射能量传输过程等)以及数值预报模式在描写对辐射能量的传输有重要影响的过程与参数的不足,也与计算机资源的限制有关。而模式预报所必需的大气水

物质等参数的资料同化依然还没有解决。这些事实表明卫星资料同化进一步发展的需求与潜力都还很大。中国卫星气象的研究起步较早,成功地发射气象卫星也有 20 多年的历史,但对卫星资料同化的集中研究只是进入 21 世纪后才开始的。尽管在中国新一代的资料同化系统中卫星资料的应用已经表现出巨大的价值,但同化的卫星资料所占总观测资料量的比例还偏低,而缺乏常规资料的部分地区的模式初值质量仍有较严重的问题,因此卫星资料同化的研究在中国尤为迫切。

2 卫星观测的基本特点及其对资料同化策略的影响

气象卫星所搭载的观测仪器(以下简称星载传感器)分为被动遥感与主动遥感两大类。前者被动接收地气系统发出的各种波长的电磁辐射,提供大气温、湿度或其他成分的垂直分布信息。由卫星观测还可以计算一些与大气运动有关的参量,如大气运动矢量(AMV)。后者主动发射电磁波,经过大气的作用后被重新接收,其强度、频率等变化反映出大气特性。从资料同化的角度,卫星观测与常规的直接观测的差别在于:(1)各类星载遥感仪器所观测到的实际上都是一定波长的电磁辐射,因而不能像传统的直接观测资料一样可被预报模式直接应用;(2)卫星观测对象是整个大气层,而不是确定高度的大气,因此确定卫星观测影响的高度和它的潜在垂直分辨率成为一个关键问题;(3)卫星观测可能存在着系统性偏差,这与直接观测的误差互相独立也有很大区别。这些特点成为卫星资料同化要解决的核心科学问题。

资料同化尽管可以采取很多方法,但它们的基

本过程是相似的。由于观测提供的信息不足且带有误差,一般需要引入有关大气状态的背景信息(通常是模式预报,为与同化的习惯术语一致,下面都称“背景场”),通过背景场与观测的对比来确定需要在多大程度上以及如何对背景场进行修正使其更接近大气真实状态。因此同化的基础是实际的观测与背景场的“观测”量间的比较。为了进行比较必须将观测与背景场转换成同时、同地、物理属性一致的量。通常将由模式变量到观测值的转换关系称为观测算子。对于卫星观测可以将模式的基本大气变量转换成星载仪器所获得的特定波长的电磁波特征量,也可以反过来将观测到的电磁辐射特征量反算成大气的特征量。前者需要引入复杂的观测算子,后者则将复杂的反演过程交给了前处理阶段。这就形成了卫星资料同化的两种不同的策略,前者称之为直接同化,后者称之为间接同化(Eyer, 2007)。策略的选择取决于观测资料的特性与同化系统的能力。在同化技术发展的早期,实际的同化系统并不

能包含复杂的观测算子,所以间接同化是唯一的途径。变分同化系统的发展使复杂观测算子的引入成为可能,也带来了卫星资料同化的突破。除了变分方法,也可以使用新的同化方案(如集合卡尔曼滤波),在卫星观测资料方面与变分方法并无大的区别,且在实际业务中还是以变分方法为主。下面几节分类讨论主要卫星观测的资料同化。

3 星载探空资料的同化

这类仪器用于探测大气温湿度廓线,根据辐射能量传输方程,卫星所测的辐射强度受到大气层温、湿度的影响,通常用一个权重函数来描述不同高度大气温湿度对辐射强度的贡献,权重函数随着波长而变化。这类仪器中最为数值预报界熟知的即 NOAA 系列卫星上的 ATOVS 资料,它由 20 个通道的红外探测器 HIRS、15 个通道的微波温度探测器 AMSU-A 与 5 个通道的微波湿度探测器 AMSU-B 所组成,图3给出后两个仪器的权重函数(Eyer, 2007)。

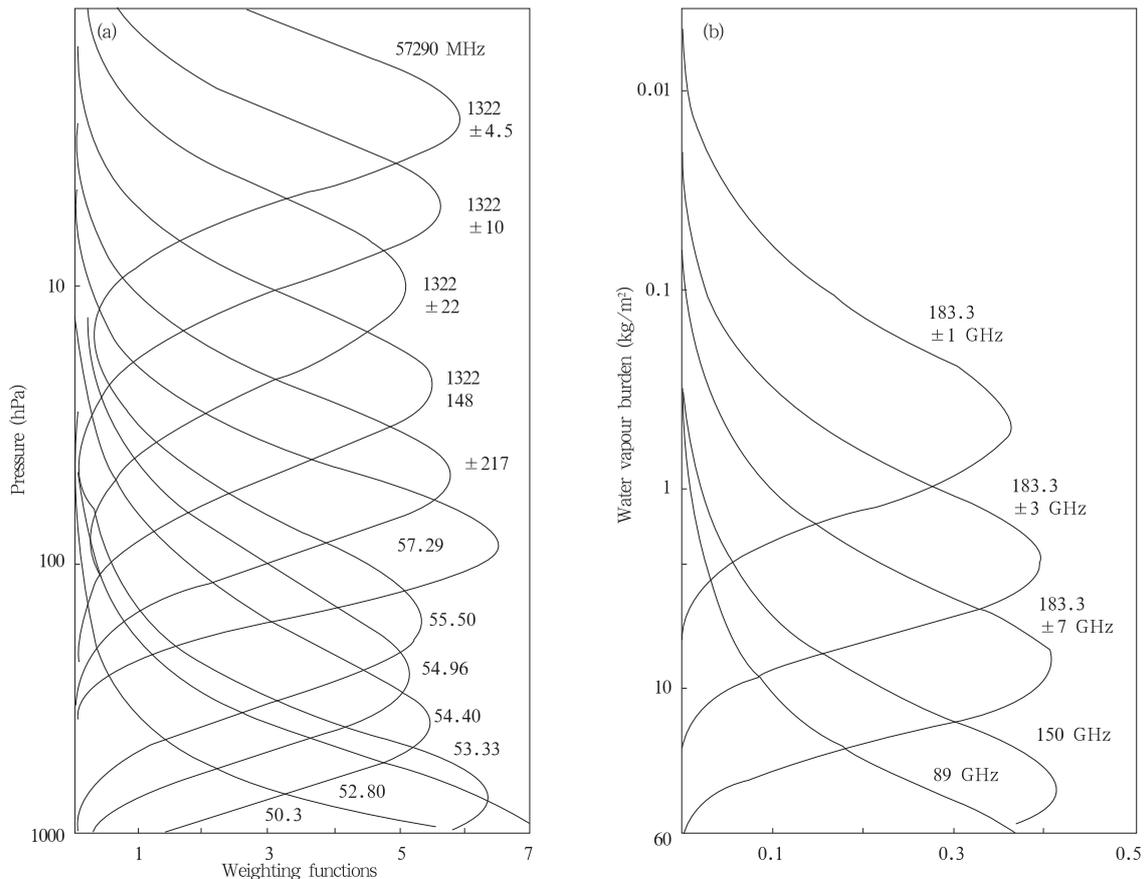


图3 AMSU-A(a)与 AMSU-B(b)的权重函数

Fig. 3 Weight function of AMSU-A (a) and AMSU-B (b) (Eyer, 2007)

由图 3 可知,单一通道的辐射值包含了一定高度范围的温、湿度信息,多通道的综合使用可以得到温湿度的垂直廓线。由于观测的辐射量不是一般同化系统分析变量,在同化过程中必须引入变量的物理变换。根据第 2 节讨论,这种变换可以在观测资料的预处理阶段实施,也可以作为观测算子引入同化系统。在前一种情况下,同化的观测量是反演后的大气温、湿度参数,同化过程相对简单,在传统的简单客观分析框架内即可实现这样的同化,因此早期普遍采用这种间接同化。但由于观测量实际是反演得到的,观测误差中包含了反演过程各个环节的误差,使得观测误差的来源复杂化。一般的反演方法都要用到某种背景信息,反演背景场基于气候值或数值预报,包括背景场的系统性偏差在内的反演背景场误差通过这一假的“观测”过程而被引入到同化结果中。从理论上讲,我们希望背景与观测误差尽可能接近无偏的正态分布。而上述方法尽管操作简单,但使误差复杂化,并带有系统性偏差,因而不是一种理想的同化方案。20 世纪 90 年代中期变分同化方法的成功应用使非线性观测算子可以直接引入到同化系统中(Eyer, 2003)。这时背景场与观测都采取其原来的形态,误差特性也变得简单。这种直接同化的方法使卫星探空的资料被有效同化到模式中,对改进数值预报做出了重要贡献。问题集中到观测算子的建立与优化上,例如如何在辐射传输方程里考虑云粒子对散射的影响,地表比辐射率的准确计算等。同时还应尽可能地消除仪器与辐射传输模式带来的系统性误差,尽管现在已经有一些简单的方法(Harris, et al, 2001),但还需要作深入的研究。这些问题的处理一般是作为变分同化系统的补充,但实际上也可以将原来的变分问题俩充,使其包含相应参数的调整,将使问题的理论特性更为清晰,求解方案的优化方向更为明确(Dee, et al, 2004)。

卫星大气探测器的一个发展方向是高光谱探测器的应用。由于采用了先进的红外分光仪、干涉仪,探测的光谱分辨率大幅度提高,仪器探测的波长数已经由几十增加到几千。理论上这使温度廓线的垂直分辨率提高到 1 km 左右(Eyer, 2007, Collard, 2007)。但如此多的观测资料的使用实际上产生了信息冗余,而过多信息冗余不仅造成计算量剧增,对于同化本身也是有害的。因此,提取观测的有效信息具有重要意义。

这里当然还涉及一个重要问题,即数值预报模式本身描写云与降水以及地面过程的能力,例如模式描写云内过程过于粗糙是当前直接同化受云影响的辐射率资料的主要障碍之一,对四维变分同化尤其如此。实际上模式的性能对于其他卫星资料的同化同样都是很重要的,但本文中我们将不对这些问题做进一步讨论。

4 大气运动矢量的同化

大气运动矢量(AMV)或称为卫星导风、云迹风等,是通过追踪连续几张卫星图像上的特征点,来得到的对大气运动的近似。早期主要使用可见光与红外云图,后来也使用水汽图像。由于地球同步卫星能对同一地区大气作高频次的观测,适合于这类追踪式的观测,因此 AMV 主要是从这类卫星得到的,但现在这类技术也应用到极轨卫星在南、北极区的观测中。尽管 AMV 只能给出单个高度上风的近似,但其空间覆盖的优势是任何其他关于风的观测资料所不能比拟的,特别是在广大的热带洋面上,几乎是关于风场的唯一观测信息,而恰在这一地区由于地转平衡不再成立,风的观测特别重要。AMV 可能是资料同化最早关注的卫星资料,即使在其他卫星资料大量进入同化系统的今天,AMV 资料在改进数值预报效果中的作用依然是不可忽视的(Forsythe, et al, 2007)。

数值预报使用 AMV 资料的效果取决于资料本身的质量与同化方案对资料的适应性。近十几年来卫星与仪器的发展,给 AMV 精度的提高创造了有利条件,但测风误差仍比较大。云高度的确定误差使 AMV 所代表的大气运动的高度有很大的不确定性,粗略估计 80 hPa 的高度误差大致相当于 10 m/s 的风速误差,这是目前 AMV 资料同化所遇到的最大挑战。一般情况是将云顶的高度作为 AMV 的高度,而目前云顶高度的确定主要是通过比较卫星测得的云顶亮温与数值预报的温度廓线来推算或者利用多个通道的晴空与云区的辐射差值,辐射传输模式的精度,数值预报的分辨率与卫星的标定等方面的局限都会成为云高的误差来源。需要进一步研究指定云高的算法,包括利用更多的通道信息。

卫星的发展使得追踪卫星图像的时空分辨率大幅度提高,因此人们希望导出中尺度的风场特征,但对于中尺度天气系统 AMV 可能更多地受到风暴移

动的控制,而与风的联系不一定紧密或关系更加复杂,这是 AMV 应用于中尺度数值预报一个不容忽视的问题。

为了改进 AMV 资料同化的效果,也需要从改进同化方案入手,使其更适合 AMV 的特点。AMV 即使完全代表空气的运动,它也是一定水平区域与垂直厚度的平均,而目前模式分辨率的差异很大,必须考虑 AMV 在模式分辨率下的代表性。在业务上,对 AMV 进行高度调整是解决 AMV 高度误差的有效做法,但应把高度调整量作为特定形式的观测偏差,同其他分析变量一起由同化系统作出优化的估计。在目前 AMV 资料同化过程中,模式预报信息同时在观测资料的生成(反演)阶段与作为同化的先验信息被重复使用,使得“观测”误差与背景场误差高度相关,当模式预报有大的误差时,同化系统不可能通过吸收观测信息来更正这种误差,构成了一种无效的同化循环,这是 AMV 同化不容忽视的一个问题。看来出路还是直接同化,目前直接同化晴空的水汽通道 AMV 已经取得一定进展,但要成为真正可业务实现的方法还有待数值预报模式对云的物理过程的描述有所改进。

5 星载散射仪的资料同化

测风散射仪是一种星载雷达,它从多个方向测量海面的后向散射辐射,由此可以导出海面的风向与风速(Stoffelen, 1997)。这一探测的概念早在 20 世纪 70 年代即已得到证实,但直至 90 年代新的卫星搭载改进后的仪器才使这类资料进入到实际的资料同化中。卫星对于同一片海面测得的一组不同方向的后向散射值,可以对应几个不同的风向,因而给资料同化带来了新问题。同化这类资料可以选择两种不同的途径。一种途径是先参考一定的背景场(例如数值预报)从几个可能风向中选取一个与背景场最接近的。这在多数情况下是可行的,但在气压系统的预报位置有明显偏差等情况下,这样的选择会把模式的错误持续下去得不到修正。另一个途径类似于前面所说的直接同化,即把所有可能的风向都提供给同化系统让其选择。通过同化系统的动力约束与其他的资料,同化系统可以给出正确的判断,此时同化结果甚至可能与背景场的风向完全相反。与星载探空资料的同化类似,后一种直接同化可能更有发展的潜力,但风矢量与后向散射系数的非线性

关系给这种作法带来相当大的困难。另外还必须考虑资料的质量特点,如在近岸地区或强风情况下误差会增大。

6 云与降水观测资料的同化

云与降水对电磁波的吸收与散射特性受制于电磁波的波长与云或降水粒子的大小,在红外波段大部分情况下可将云看作是不透明的,因此卫星上接收到的红外辐射尽管可以获得几千米的分辨率,但不能提供云顶以外关于降水与云的信息。而在微波波段,辐射可以来自云中的液态水甚至云下的大气,是仅有的直接反映降水与云中液态水特征的被动遥感观测,但受到天线尺寸的限制,观测的水平分辨率在几十千米的量级,与对流云的尺度不匹配。这是目前同化应用卫星对云与降水的观测时所面对的事实。由于多数模式所能够解析的也仅是空间分辨率达到几十千米的云与降水的宏观特征,因此对云与降水的微波观测的同化仍有意义。红外观测尽管只间接提供降水信息,但由于它是目前被动遥感中能到达对流系统所需要的分辨率的唯一观测数据,因此也不能忽视其使用。

在卫星资料同化中提取云与降水信息有两方面的目的(English, et al, 2007),第一个目的是在有云或降水的情况下精确得到大气温度与湿度的分析。除非在资料同化的卫星观测算子中较准确地考虑了云与降水中的水物质粒子对辐射传输的影响,受到云与降水影响的观测资料就不能正确地应用于同化。往往在预处理阶段对资料进行筛选,分离出不受云影响的辐射率或在云对辐射的影响较微弱的情况下将这种影响在辐射传输模式中较好地模拟出来(例如对微波波段)。随着同化技术的发展与辐射传输模式的完善,已经有可能同化云区的辐射量,特别是对云的敏感性较弱或只对云的个别特征量,如含水量敏感的通道的辐射量。但对于利用部分有云地区的红外观测来进行云的高度以下的同化方面至今仍没有大的进展。

第二个目的是通过卫星资料的同化提供正确的模式中云与降水的初值。由于问题的复杂性,大部分还是采用间接同化反演后的云与降水信息(Mariscal, et al, 2000, 2002)。红外图像所得到的有关积云分布可以作为模式的非绝热加热项,物理初始化即采用了这种方案(Krishnamurti, et al, 1996;

Heckley, et al, 1990; Puri, et al, 1990)。近年来先用一维变分方法根据热带测雨卫星(TRMM)的资料反演出气柱的总含水量,然后将它应用于四维变分同化(1D+4DVar)。同样的方法,也应用于由SSM/I资料所得到的降水率与对微波辐射率的直接同化(Moreau, et al, 2003; Bauer, et al, 2002, 2006a, 2006b),其结果对于全球预报的改进是很明显的。对于受到云影响的红外和微波观测及各种天基资料的同化都涉及到观测算子、同化方法和模式的物理过程的进一步优化。在目前的条件下1D+4DVar的同化方案是比较有效的(Alan, et al, 2008)。

7 GPS 掩星观测资料的同化

无线电掩星观测最初应用于对行星大气的观测,它通过大气折射率的变化来反演大气的温、湿度。GPS卫星发出的无线电信号通过地球的边缘大气层时,其路径由于折射率的变化而发生弯曲,此信号被位于地球后侧的另一颗卫星捕获,构成一次掩星事件(图4)。星载的GPS接收机所接受到的信号的时间和方向势必与未经折射的路径不同,因为折射率包含了水汽、湿度的信息,所以可以用掩星资料同化作为大气的温、湿度。近十几年来,先后发射了一系列的卫星进行掩星观测试验(Eyer, 1994, 2007; Healy, et al, 2006),特别是2006年实施的“应用于气象、电离层与气候的星座观测系统(COSMIC)”为掩星资料同化的业务应用创造了条件。多方面的试验已经证明,COSMIC对改进全球预报有很大价值。对于掩星资料的同化也存在直接同化观测到的原始数据还是同化经过复杂的预处理和反演后得到的大气物理变量的不同策略,可以选择同化反演得到的温度、湿度廓线或者同化反演得到的折射率的廓线甚至直接同化弯曲角的廓线。由于目前的反演算法不能很好地分离出温度与湿度对于折射率的贡献,一般采取第2或第3种方法,它们没有特别的区别,但后者可以利用模式所包含的水平梯度信息来克服无线电掩星资料水平分辨率低的困难,但有人从实际模式出发认为模式顶较低时同化折射率较好,而对于顶较高的模式则同化弯曲角更好。国际上一些主要数值预报业务中心已经将掩星资料的同化作为其业务资料同化的一部分,我们国家的试验也已经证明这类资料有巨大的应用潜力。

掩星资料与其他卫星资料有很好的互补性,已有的研究表明掩星观测资料与高光谱红外卫星探空资料联合同化使得从对流层到平流层低层的大气温、湿度的分析误差整体误差大幅度减小,弥补了单项资料的贡献局限在一定层次的不足。由于两者的误差特性不同,如何得到最佳效果有待深入研究。

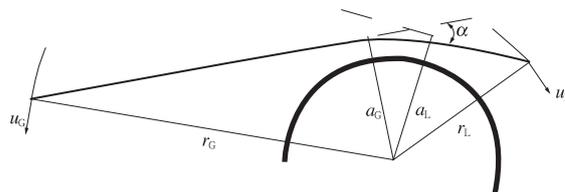


图4 GPS无线电掩星观测

Fig. 4 Observation by GPS-radio occultation (from Eyer, 2007)

8 同化效果的诊断

卫星资料同化对改进数值预报的贡献需要进行科学分析(Collard, et al, 2003)。最简单的办法是进行同化系统使用与不使用某类卫星资料的对比试验,从而判断该类卫星资料的贡献。但是各个观测资料之间往往会出现信息重叠的现象,简单的比较难以反映各类资料的真实贡献与重要性,需要对各类观测的贡献进行客观定量的分析。一个较好的指标是单类观测的信息量或与其相当的信号自由度,它们都与这类观测对分析误差总方差的减小的贡献有关,如背景场误差的协方差矩阵为 S_b ,而使用观测后的分析误差矩阵为 S_a ,则观测的信息量为 $H = \frac{1}{2} \ln(S_a^{-1} S_b)$,而信号自由度为 $d_s = \text{tr}(S_a S_b^{-1})$,但对于大型的同化系统其计算过程比较复杂,也有人尝试采用集合卡尔曼滤波的思路,设计一组集合预报并用集合预报成员间的离散度来估计同化的背景与分析误差的统计量。

另一类诊断方法是直接计算分析或预报误差对于每一个观测的敏感性。如果分析或预报误差用一个二次泛函 J 来表示,而观测资料用向量 y 表示,则误差对观测的敏感性定义为 $\frac{\partial J}{\partial y}$,根据同化的一般

公式 $\frac{\partial J}{\partial y} = \frac{\partial x_a}{\partial y} \frac{\partial J}{\partial x_a} = K^T \frac{\partial J}{\partial x_a}$,这里 K 是增益矩阵,这一计算要通过同化系统的伴随系统来实现。需要注意的是敏感性并不表示实际同化中观测的贡献,

因此要将敏感性与新息(innovation)联合起来考虑。不论采用哪种方法,其目的都是为了客观地确定卫星观测对资料同化的作用。这对优化同化过程中各类卫星资料的使用具有十分重要的意义,应该纳入到日常同化业务中。

9 中国的现状与发展重点

中国在 20 世纪 80 年代末至 90 年代初相继发射了第一颗气象卫星并建立了全球数值预报业务。但对卫星资料同化的深入研究起步较晚。进入 21 世纪后,卫星资料同化受到了空前重视,2003 年在中国新一代数值预报系统 GRAPES 的三维变分同化框架内,实现了对 NOAA 系列卫星 ATOVS 资料的直接同化(Zhu, et al, 2008; Zhang, et al, 2004),中国卫星资料在数值预报中的应用进入一个新的阶段。紧接着在卫星资料的偏差订正、地表比辐射率计算的改进等与卫星探空资料同化相关的问题上的研究也取得了有价值的成果(刘志权等, 2007; 顾松强等, 2006)。中国新一代气象卫星 FY-3 于 2008 年发射后,在短时间里卫星与数值预报的研究人员合作完成了 FY-3 的微波温度与湿度探测器的资料同化试验,肯定了其在数值预报中的应用价值。中国科学家多年来在 FY-2 系列静止卫星的 AMV 产品生成方面取得了有国际影响的成果,在云高的确定、质量控制等多方面又有了新的改进,在 FY-2 的 AMV 资料的同化应用方面作了进一步的研究,提高了在数值预报中的使用率(Han, et al, 2007)。

近几年气象卫星在中国数值预报中的贡献已经大幅度增长,以目前在国家气象中心试验运行的中国新一代全球预报系统 GRAPES-GFS 为例,同化的卫星资料量已占总资料量的 40%左右,卫星资料的同化带来了中期数值预报的明显改进,特别是常规资料稀缺的南半球地区,这些卫星资料的同化使可信预报时效延长了 2 天左右,并且这些影响传播到常规资料稠密的北半球,使那里的中期时效预报也有明显的提高。但中国卫星资料的使用率仍然偏低,通过推进卫星资料同化提高中国的数值预报质量还有很大的潜力。为此既需要加强面向数值预报业务应用的卫星资料同化方案的优化,也需要加强面向长远发展的新理论与方法的研究。

对于已经实现三维变分直接同化的 ATOVS 及同类资料需要把同化框架升级为四维变分,并把质

量控制与偏差订正也纳入到变分同化中。而地表比辐射率的计算与云的影响也需要作深入的研究。关于后者应与云的信息的提取及其在云的初始化中的应用结合起来,发展类似于 1DVar+4DVar 的算法提高相关资料在中尺度预报中的应用。并要尽快开展对新的红外高光谱资料同化的研究,使这类资料的潜力尽早得到利用。

中国的 AMV 生成技术在国际很有影响,需要结合资料同化进一步提高在数值预报中的使用率,特别是研究利用中国的数值预报产品减少云高确定误差的方法。当前模式的分辨率已经与卫星观测的像元相当,可以对模式预报的云进行与实际的云图相同的追踪模拟,优化追踪算法,并为 AMV 的直接同化创造条件。

对于星载的主动遥感仪器,除了已经在同化系统中使用的海面风场等以外,对于云的信息的利用对数值预报有特别重要的意义,在这方面直接变分同化不是唯一的途径,在现阶段通过物理初始化或其他动力逼近的方法将反演产品同化到模式中可能仍是一种较好的方案。

卫星资料的同化效果取决于数值预报系统的整体性能。中国目前的四维变分同化还没实现业务化,大部分研究工作也都基于比较简单的资料同化平台,限制了卫星资料同化效果的优化与研究的深度;数值预报模式对云的过程的描写不细致,限制了与云的过程相联系的卫星资料的直接同化试验。因此同化系统与模式本身的发展是以上各方面研究的基础,需要引起更多的关注。

References

- Bauer P, Mahfouf J-F, di Michele S, et al. 2002 Errors in TMI rainfall estimates over ocean for variational data assimilation. *Quart J Roy Meteor Soc*, 128: 2129-2144
- Bauer P, Lopez P, Benedetti A, et al. 2006a. Implementation of 1D+4D-Var assimilation of microwave radiances in precipitation at ECMWF. II: 4D-Var. *Quart J Roy Meteor Soc*, 132: 2307-2332
- Bauer P, Moreau E, Chevallier F, et al. 2006b. Multiple-scattering microwave radiative transfer for data assimilation. *Quart J Roy Meteor Soc*, 132: 1259-1281
- Collard A, Healy S. 2003. The combined impact of future space-based sounding instruments on numerical weather prediction. *Quart J Roy Meteorol Soc*, 129: 2741-2760
- Collard A. 2007. Assimilation of AIRS and IASI at ECMWF//Pro-

- ceeding of ECMWF Seminar on Recent Developments in of Satellite Observations in Numerical Weather Prediction. ECMWF Publication, Reading UK, 127-150
- Dee D P. 2004. Variational bias correction of radiance data in the ECMWF system // Proceedings of the ECMWF Workshop on Assimilation of High Spectral Resolution Sounders in NWP, 28 June-1 July 2004, Reading, UK, 97-112
- English S J. 2007. Issues in the assimilation of cloud and precipitation affected radiances and prospects for future instruments // Proceeding of ECMWF Seminar on Recent Developments in of Satellite Observations in Numerical Weather Prediction. ECMWF Publication, Reading UK, 59-74
- Eyer J R, Kelly G A, McNally A P, et al. 1993. Assimilation of TOVS radiance information through one-dimensional variational analysis. *Quart J Roy Meteor Soc*, 119:1427-1463
- Eyer J R. 1994. Assimilation of radio occultation measurements into a numerical weather prediction system. Tech Memo, 199, ECMWF Reading, UK
- Eyer J R. 1997. Variational assimilation of remotely sensed observations of atmosphere. *J Meteor Soc Japan*, 75:331-338
- Eyer J R. 2007. Progress achieved on assimilation of satellite data in numerical weather prediction over the last 30 years // Proceeding of ECMWF Seminar on Recent Developments in of Satellite Observations in Numerical Weather Prediction, ECMWF Publication, Reading UK, 1-27
- Forsythe M. 2007. Atmospheric motion vectors: past, present and future // Proceeding of ECMWF Seminar on Recent Developments in of Satellite Observations in Numerical Weather Prediction, ECMWF Publication, Reading UK, 59-74
- Geer A J, Bauer P, Lopez P. 2008. Lessons learnt from the operational 1D + 4D-Var assimilation of rain- and cloud-affected SSM/I observations at ECMWF. *Quart J Roy Meteor Soc*, 134: 1513-1525
- Gu Songqiang, Wang Zhenhui, Weng Fuzhong, et al. 2006. A study for improving a microwave land surface emissivity model with NOAA/AMSU data and the GRAPES 3DVar system. *Plateau Meteor (in Chinese)*, 25(6): 1101-1106
- Han Wan, Jishan Xue. 2007. Adaptive tuning of background error and satellite radiance observation error for operational variational assimilation. *Proceedings of SPIE*, 2007, 6970, 44:1-9. doi: 10.1117/12.774771
- Harris B A, Kelly G A. 2001. A satellite radiance bias correction scheme for data assimilation *Quart J Roy Meteor Soc*, 127: 1453-1468
- Healy S B, Thépaut J-N. 2006. Assimilation experiments with CHAMP GPS radio occultation measurements. *Quart J Roy Meteor Soc*, 132: 605-623
- Heckley W A, Kelly G A, Tiedtke M. 1990. On the use of satellite-derived heating rates for data assimilation within the tropics. *Mon Wea Rev*, 118:1743-1757
- Kelly G, Thépaut J-N. 2007. Evaluation of the impact of the space component of global observing system through observing system experiments // Proceeding of ECMWF Seminar on Recent Developments in of Satellite Observations in Numerical Weather Prediction. ECMWF publication, Reading UK, 327-346
- Krishnamurti T N, Bedi H S. 1996. A brief review of physical initialization. *Meteor Atmos Phys*, 60: 137-142
- Liu Zhiqian, Zhang Fengying, Wu Xuebao, et al. 2007. A regional ATOVS radiance-bias correction scheme for radiance assimilation. *Acta Meteor Sinica (in Chinese)*, 65(1):113-123
- Mar'ecal V, Mahfouf J-F. 2000. Variational retrieval of temperature and humidity profiles from TRMM precipitation data. *Mon Wea Rev*, 128: 3853-3866
- Mar'ecal V, Mahfouf J-F. 2002. Four-dimensional variational assimilation of total column water vapour in rainy areas. *Mon Wea Rev*, 130: 43-58
- Moreau E, Lopez P, Bauer P, et al. 2003. Rainfall vs. microwave brightness temperature assimilation: A comparison of 1D-Var results using TMI and SSM/I observations. *Quart J Roy Meteor Soc*, 130: 827-852
- Puri K, Miller M J. 1990. The use of satellite data in the specification of convective heating for diabatic initialization and moisture adjustment in numerical weather prediction models. *Mon Wea Rev*, 118: 67-93
- Shapiro M, Thorpe A, et al. 2004. THORPEX International Science Plan. WMO-TD No 1246, World Meteorological Organization Secretariat, Switzerland
- Stoffelen A, Anderson D. 1997. Scatterometer data interpretation: measurement space and inversion. *J Atmos Ocean Tech*, 14: 1298-1313
- Zhang Hua, Xue Jishan, Zhu Guofu, et al. 2004. Application of direct assimilation of atovs microwave radiances to typhoon track prediction. *Adv Atmos Sci*, 21:283-290
- Zhu Guofu, Xue Jishan, Zhang Hua, et al. 2008. Direct assimilation of satellite radiance data in GRAPES variational assimilation system. *Chinese Sci Bull*, 53: 3465-3469

附中文参考文献

- 顾松强, 王振会, 翁富忠等. 2006. 利用 NOAA/AMSU 资料和 GRAPES 同化系统对陆面比辐射率计算的改进研究. *高原气象*, 25(6):1101-1106
- 刘志权, 张凤英, 吴雪宝等. 2007. 区域极轨卫星 ATOVS 辐射偏差订正方法研究. *气象学报*, 65(1):113-123