

# 气象卫星遥感资料同化及其在数值预报中的应用

王恬

兰州大学大气科学学院 兰州 730000

## 摘要

卫星作为一种非常规的探测方式,其出现在各个领域均发挥了巨大的作用,同样在大气科学领域也占据了无法替代的地位。卫星资料大大丰富了气象观测的内容和范围,成为数值天气预报初始场的重要信息来源。目前各个主要天气预报中心的全球资料同化系统所采用的观测资料中,就数量而言卫星资料超过了 90%。把气象卫星探测的大气状态参数同化到数值预报模式中已经成为弥补常规探测资料不足、提高数值模式预报精度的重要手段。文章介绍了卫星遥感资料的同化以及在数值天气预报中应用的基本情况,并简要介绍了 NWP SAF 开发的直接同化的快速辐射传输模型 RTTOV。

关键词:气象卫星,辐射传输,资料同化,RTTOV,数值预报

## ABSTRACT

Satellites as an unconventional form of detection, it appears in various fields have played a great role, also in the field of atmospheric science has occupied the position can not be replaced. Satellite data have greatly enriched the content and scope of meteorological observations, became important sources of information of the initial field of numerical weather prediction. At present all major weather forecasting centre in the observation data using the global data assimilation system, number of satellite data for more than 90%. Atmosphere state parameter detection of meteorological satellite data assimilation in numerical weather prediction model has become a make up for the routine detection of insufficient information, important means of improving the precision of numerical model predictions. The article is mainly about the assimilation of satellite remote sensing data and the basic conditions of application of numerical weather prediction. And also briefly introduces the NWP SAF development of direct assimilation of the RTTOV fast radiative transfer model.

### 1. 引言

数值天气预报(NWP)不是精确的初值问题,决定数值天气预报准确率的两个主要因素是数值模式本身的完善程度和数值模式初始场的准确程度。因此,提高数值预报水平的途径一般有两个,一是改进模式物理过程,二是改进模式初始场。目前,在数值预报模式不断趋于完善的情况下,模式初始场的准确程度对数值天气预报水平的提高显得尤为重要,能否为数值预报模式提供准确、协调的模式初始分析场成了现代数值天气预报成功与否的关键。

数值模式的初始场是由观测资料提供的。目前的观测资料由常规观测资料(主要为地面测站资料、无线电探空资料)和非常规探测资料(如雷达资料、卫星辐射率资料)构成。常规资料存在着时间取样不连续、空间分布不均匀、覆盖范围不完整等问题,而卫星资料由于具有空间覆盖广、时间分辨率

---

作者简介:王恬,女,1988年生,大气物理学与大气环境专业 2011 级硕士生  
导师张述文,研究方向气象卫星资料同化

高、水平分辨率高、资料一致性好、经济效益高的优势而在数值预报中的应用日益受到重视。但是卫星资料最大的不足是它的探测量一般不是模式变量，而是辐射率，与温度、湿度等模式变量之间的关系是非线性的，无法为数值模式直接使用，因此卫星资料的同化具有一定的难度。而气象资料同化的目的就是这些观测资料中尽可能多的提取出有用信息，为模式提供一个在动力和热力上相协调的最优初始场。所以，气象卫星资料的同化研究具有重要的意义，已成为数值天气预报研究中的一个热点问题。

## 2. 气象卫星遥感原理

近年来，大气探测技术取得了显著的发展。气象卫星作为大气探测技术中的一种新兴技术，近年来也获得了较快的发展。目前，气象卫星已经成为地球大气探测系统中的主要成员和制作全球天气预报必不可少的大气遥感的关键技术。

一般大气遥感可以分为主动式遥感和被动式遥感两种方式。卫星利用星载探测器从卫星上遥测来自地球大气系统的电磁波辐射信息，从而间接推导出表征大气物理状态的各种参量，属于被动式遥感。这种方式只需要能感应电磁辐射的接收系统。所以，它具有仪器的重量轻、体积小和耗能少的优点。被动遥感利用太阳或地气系统的自然辐射源，气象卫星探测大都采用被动遥感方式，即大气中各种物质的热辐射是被动式遥感的重要信号源<sup>[3]</sup>。因此，大气遥感方法的理论基础是大气辐射传输理论。被动遥感推动了用极轨气象卫星对全球大气和地表面温度、成分廓线、地表面性质，以及辐射通量分量进行研究<sup>[1]</sup>。

### 2.1 大气辐射传输的基本原理

自然界的一切物体，只要温度不等于绝对温度零度，都会以电磁波的形式向外发射辐射。实际上，所有的物体都是一边发射辐射，失去能量，一边接收周围物体及太阳的辐射，增加能量，如此进行着能量的交换。因此，大气成分对电磁辐射的吸收和发射是研究大气辐射传输问题的基本物理过程。

由于大气的吸收和散射作用，电磁辐射能在大气中传输时会不断减弱。吸收作用主要发生在辐射光谱的红外、微波波段，散射作用主要发生在辐射光谱的可见光波段。吸收作用的强弱不仅与波长有关，还与大气的温度、压力及大气中吸收物质的含量有关。发射物质可以产生所有波长的辐射，然而，对于大气应用来说，紫外、可见光、红外和微波辐射是最为重要的。

辐射与大气和地表之间的相互作用表现为辐射的发射、吸收和反射，这为从卫星资料遥感地表和大气提供了大量的信息。由于气象卫星探测器直接探测到的是多个频谱波段内辐射到空间的热辐射量，因此不能直接探测大气的温度、湿度等状态参量。若不考虑反射，卫星接收到的辐射是地球表面的辐射和大气辐射之和，即<sup>[2]</sup>

$$L(\nu, \theta) = \tau(\nu, \theta, p_s)B(\nu, T_s) - \int_0^{p_s} B[\nu, T(p)] \frac{\partial \tau(\nu, \theta, p)}{\partial p} dp \quad (2.1)$$

上式的第一项表示来自地面的辐射经过大气削弱后到达卫星高度的辐射，第二项表示大气各层发出的辐射经过衰减后到达卫星高度的辐射。其中， $L(\nu, \theta)$ 是中心频率为 $\nu$ 、卫星观测天顶角为 $\theta$ 的

出射辐射强度,  $B(\nu, T_s)$  是 Planck 函数,  $\tau(\nu, \theta, p)$  是从气压层到大气层顶的透过率,  $p$  表示气压,  $p_s$  和  $T_s$  分别表示地面气压和地面温度,  $T(p)$  表示大气温度廓线, 大气湿度廓线包含在大气透过率  $\tau(\nu, \theta, p)$  中。

在红外波段, 电磁辐射的主要吸收物是二氧化碳( $\text{CO}_2$ )、水汽( $\text{H}_2\text{O}$ )和臭氧( $\text{O}_3$ )。图 2.1 描绘了近红外窗区各个大气成份吸收的细节, 根据基尔霍夫定律, 就可以计算出不同高度大气的红外热辐射信号强度等特性。由图可以看出,  $\text{H}_2\text{O}$  在  $6.3\mu\text{m}$  有一个很强的吸收带, 可以用于探测大气的湿度结构;  $\text{O}_3$  在  $9.6\mu\text{m}$  有一个吸收带, 可用于探测大气的臭氧含量;  $\text{CO}_2$  在  $4.3\mu\text{m}$  和  $15\mu\text{m}$  分别有一个吸收带, 可以用于探测大气的温度结构。

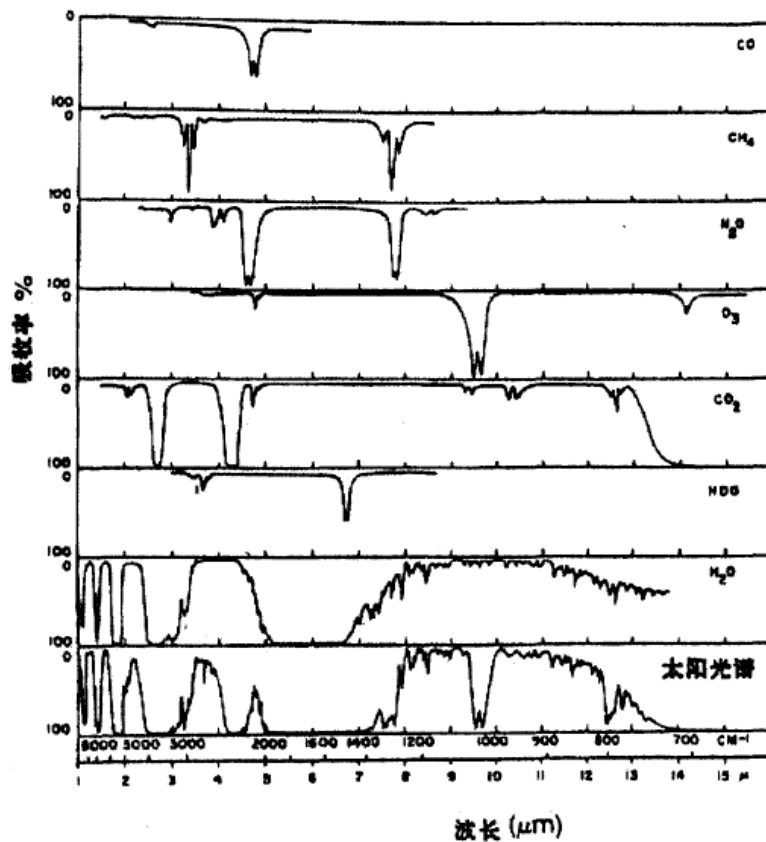


图 2.1 大气近红外吸收图谱 (引自 J.H.ShawinHoward 等, 1955)

在微波波段, 电磁辐射的主要吸收物是氧( $\text{O}_2$ )和水汽( $\text{H}_2\text{O}$ )。图 2.2 是  $\text{O}_2$  和  $\text{H}_2\text{O}$  微波吸收谱。可以看出,  $\text{O}_2$  在  $60\text{GHz}$  附近有一个吸收带, 可用于探测大气温度结构;  $\text{H}_2\text{O}$  在  $183.31\text{GHz}$  有一个吸收带, 可用于探测大气湿度结构。

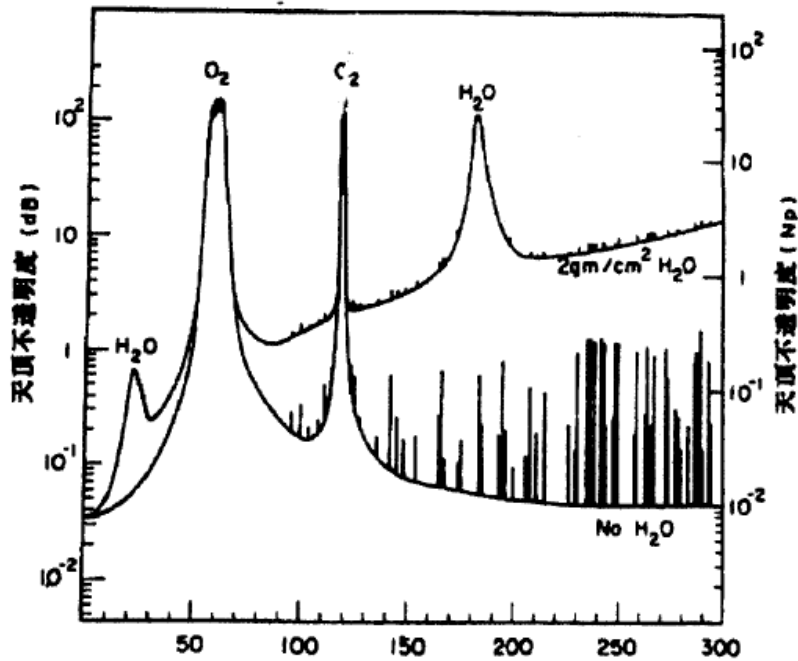


图 2.2 大气微波吸收图谱 (引自 Waters, 1976)

根据大气吸收、发射及选择性吸收的特点,如果卫星探测器有足够的接收通道,而且选择在从吸收带中心到边缘的不同位置上,就能够获取不同高度的热辐射,然后根据辐射传输方程把热辐射与大气的温度和吸收气体结构联系起来,得到大气各层的气体成份和热力状态。

## 2.2 大气垂直探测器 ATOVS 仪器介绍

新型大气垂直探测器 ATOVS(Advanced TIROS-N Operational Vertical Sounder)是美国国家海洋局第五代 NOAA 卫星的系列传感器的一种,是大气垂直探测器 TOVS 的改进型。TOVS 主要由三个相互独立的探测器组成:高分辨率红外辐射探测器 3 型(HIRS/3)、先进的微波探测装置 A(AMSU-A)和先进的微波探测装置 B(AMSU-B),主要用于大气温度和湿度探测,同时也具备探测地表参数的能力。和 TOVS 相比,ATOVS 具有探测通道多、空间和时间分辨率高等特点,能充分发挥各探测器所具有的穿透云层、探测云下大气垂直结构的独特能力,从而大大改进了大气温度和湿度的探测水平<sup>[2]</sup>。此外,ATOVS 不仅可以提供晴空和部分有云情形的大气温度、湿度的垂直结构信息,还可以提供云天条件下大气温度和湿度廓线的垂直结构信息,使卫星大气探测达到全天候探测的能力。

AMSU-A 是一个全功率微波扫描辐射计,由一个 13 个通道的 AMSU-A1(温度探测)和 2 个通道 AMSU-A2(窗区/表面)组成,共有 15 个探测通道。其中 AMSU-A1 为 AMSU-A 的 3-15 通道,它的 3-14 通道是氧分子 50~60 微波吸收带,用于探测从地表到 40km(即从 1000hPa~2hPa)的大气温度垂直廓线,而 AMSU-A1 的 89GHz 和 AMSU-A2 的 2 个通道将辅助探测温度以及作表面发射率、大气可降水和云中液态水的吸收订正。AMSU-A 资料的主要作用在于调节温度场,温度正增量伴随湿度的负增量,反之亦然。

AMSU-B 是一个 5 通道的微波辐射计,处于整个 AMSU 的第 16~20 通道主要用于观测来自不同高度的大气层的辐射,获得全球的湿度廓线。其中,18~20 通道是频率最高的,分布在最强的水汽吸收线 183GHz 附近,提供大气的湿度资料;16~17 通道的频率分别为 89GHz、150GHz,可以纵深

穿透大气层到达地球表面，反演出云中液态水、大气可降水。AMSU-B 资料主要贡献在于改进湿度场，湿度正增量伴随温度的负增量，反之亦然。

HIRS/3 是 TOVS 中 HIRS/2 的改进型，其性能基本与 HIRS/2 相同，由 19 个红外通道和一个可见光通道组成。其中 7 个通道位于 15 $\mu\text{m}$  长波  $\text{CO}_2$  吸收带，4 个通道位于 4.3 $\mu\text{m}$  短波  $\text{N}_2\text{O}$  吸收带，主要用于探测大气温度的垂直分布 2 个位于 6.7 $\mu\text{m}$  水汽吸收带的通道用于探测大气湿度的垂直分布，位于 9.7 $\mu\text{m}$  的臭氧吸收带用于探测臭氧含量，其余的几个通道用于探测地表温度和云检测。

### 3. 卫星资料的同化

目前卫星资料同化有两种方式：反演同化和直接同化。

#### 3.1 卫星资料的反演同化

最早的卫星资料同化采用的是反演同化方式。卫星资料反演同化首先解决反演问题，用卫星的辐射率探测资料确定温度和湿度等大气参数的垂直廓线和其他地球物理参数，然后同化反演结果，其反演过程与数据同化过程是相互独立、分别进行的。这种同化方式中，卫星资料反演起了把卫星辐射率与模式变量的非线性关系转变为卫星反演值与模式变量的线性关系的作用，使得其后的同化过程可以应用 OI 法等较易实现的线性同化方法<sup>[5]</sup>。

卫星资料反演问题是一个求解非线性、非适定、带有特别边界条件的 Fredholm 积分方程问题，该问题的求解至今仍是公认的一大难题。主要原因是：一是在数学上反映物理实质的高阶非线性项的效应问题；二是在物理上隐藏着反映数学问题的非适定性问题<sup>[4]</sup>。这种同化方式中，卫星资料反演起了把卫星辐射率与模式变量的非线性关系转变为卫星反演值与模式变量的线性关系的作用。耦合法就是一种将卫星辐射率转换为模式参数的过程与数值模式的时间积分过程相结合的反演同化，又称为交互反演。在耦合法的同化阶段，卫星资料反演与数值模式积分连续交替进行：卫星资料反演以数值模式预报场为初估廓线，反演结果与初估值的偏差作为同化量插值回模式格点，再以经偏差订正的数值模式预报场为模式初值场开始模式的预报积分，然后模式预报结果又作为下一次反演的初估值，如此相互作用循环下去<sup>[6]</sup>。

#### 3.2 卫星资料的直接同化

为解决卫星资料反演同化中存在的问题，人们在积极提高卫星探测器的垂直分辨率和全天候探测能力的同时，还致力于探索在数值预报模式中引入卫星探测信息的新方法。直接同化卫星探测资料就是后者的产物。

与卫星资料的反演同化相比，卫星资料的直接同化实际就是在观测算子中包含大气辐射传输(RT)正演模式，并用变分法等有效的数据同化方案直接同化以“原始”形式或近“原始”形式的卫星辐射率(或亮温)为同化量，这样不仅能从观测中获取更多的信息，而且避免了复杂的卫星资料反演计算及其带来的反演误差。事实上，卫星资料的同化分析和反演都是由一组已知观测确定大气状态的反问题，区别仅在于同化获得的是模式格点上大气真值的近似，而反演获得的是探测点上大气真值的近似，因此具有内在统一性<sup>[7]</sup>。直接同化卫星辐射率的优点就在于统一了反演与同化过程，避免了反演误差，并能从卫星资料中获取更多的信息。变分法能处理观测量与模式变量间的非线性或非直

接关系,因此已成为直接同化卫星辐射率资料时最常采用的同化方法。

许多研究表明,直接同化卫星辐射率对全球的 NWP 具有一致的正作用,并且由于有 ECMWF 和 NCEP 的成功经验,当前在业务数值预报中应用卫星资料的趋势是直接同化卫星辐射率。

### 3.3 常用的直接同化方法

四维数据按照物理约束模式约束和误差结构等原则混合在一起,构成四维大气状态的最优估计,这就是四维数据同化。数据同化有两种方式:间断同化和连续同化。前者每隔 6 小时或 12 小时,将收集的数据和模式演变数据同化一次。而连续同化则是将随时收集到的数据进行同化。连续同化的问题在于新注入的数据,引起前 6 小时模式降水太多或太少。所以常用间断同化方式。新注入的数据对运行中的模式有“扰动”作用。变分法就是寻找物理系统的扰动能量极小时的平衡状态。扰动能量通常表示为齐次二次型(泛函)。因而变分法的基本问题是寻求这种泛函的极值(局部极小或极大),即泛函的梯度等于零的状态变量。用共扼斜量法可求解泛函极值<sup>[8]</sup>。

当前数值天气预报中心的业务同化系统大多采用变分法。变分数据同化可抽象为最优控制论中的泛函问题,包括四项内容:二次泛函选择、预报模式和观测算子及其相应的共扼、梯度计算和极小化算法<sup>[8]</sup>。

变分同化方法可应用复杂观测算子,使与模式变量非线性相关的观测量的同化变得容易的一种资料处理方法。它通过调整大气模式的初值,寻找一个在最小二乘意义下尽可能接近给定时间段内有效观测的模式解为基本思想,从而允许模式变量(分析变量)与观测变量之间是一种复杂的非线性关系。经过这些年的研究与发展,已成为业务和科研单位资料同化的主要方法<sup>[9]</sup>。通常具体称运用于一维、二维、三维或四维空间的变分同化技术为相应的一维变分(1D-Var)、二维变分(2D-Var)、三维变分(3D-Var)和四维变分(4D-Var)同化方法。4D 空间的第四维为时间。实际应用中的三维变分(3D-Var)和四维变分(4D-Var)有着基本的物理基础,两者主要的差别在于 3D-Var 较 4D-Var 需求较小的计算量,而 4D-Var 由于与数值模式联系而具有动力约束方面的优越性。当前同化方案的发展趋势是一方面 3D-Var 仍在普遍使用,同时 4D-Var 又是发展的方向。

变分同化和辐射转换变分法的优点:(1)直接应用卫星探测辐射率;(2)同化非常规数据和历史数据;(3)考虑非线性关系;(4)应用模式预报值;(5)缩短模式 Spin-up 时间,抑制不实际的重力波;(6)避免模式初值化;(7)构成一维到四维同化/辐射转换方案;(8)研究其它方案的理论背景及其相互间的关系。

## 4. 卫星资料直接同化模式介绍

这里介绍的大气辐射传输模式是由欧洲中期数值天气预报中心(ECMWF)开发的用于在数值天气预报中同化卫星资料的快速辐射传输模式 RTTOV。

### 4.1 RTTOV 模式简介

RTTOV 是由 ECMWF 开发的用于模拟多种气象卫星探测的地球境外红外和微波辐射的快速辐射传输模式。

目前该模式依然在不断发展和改进中,最新版本为 RTTOV V10。该模式可以处理 NOAA 系列极轨卫星、GOES 系列静止卫星的 TOVs/ATOVS 不同通道红外和微波的探测资料,利用大气温度、湿度、O<sub>3</sub>、云中液态水垂直廓线以及若干云和地表参数作为模式输入变量,计算卫星相应通道的辐射率值。该模式具有模拟晴天和有云天气大气辐射传输过程的能力。模式在垂直方向上从地面到大气层顶(1013.3hPa—0.1hPa)将大气分为 43 层,最新的 RTTOV V10 将大气分为了 51 层,气压范围也扩展为 1050.00hPa—0.005hPa。该模式考虑了高层大气中水汽对红外/微波辐射的吸收作用,采用逐线积分方法计算大气透过率,计算中充分考虑了水汽、均匀混合气体和 O<sub>3</sub> 的相互作用,使用了 FASTEM 模式计算微波洋面表面辐射出射率;将 O<sub>3</sub> 垂直廓线作为模式初始值计算模式层到外空间的透过率;考虑了云中液态水对微波通道的影响。与其他辐射传输模式相比,该模式的一个显著特点是 RTTOV 不仅有正演模式,即根据给定的大气参数计算相应的辐射率,而且还有切线性模式和伴随模式。

在 RTTOV 模式中,当考虑晴空和阴天两种情况时,在频率为 $\nu$ 和观测视角为 $\theta$ 的大气表面,忽略散射的影响,大气的上行辐射可以近似的表示为<sup>[10]</sup>:

$$L(\nu, \theta) = (1 - N)L^{Clr}(\nu, \theta) + NL^{Cld}(\nu, \theta) \quad (3.1)$$

其中,  $L^{Clr}(\nu, \theta)$ 和 $L^{Cld}(\nu, \theta)$ 分别是晴空和充满云的阴天大气层顶的上行辐射, N是云的覆盖量。

如果云的覆盖量N为 0, 即对于完全的晴空,  $L^{Clr}(\nu, \theta)$ 可以写成

$$L^{Clr}(\nu, \theta) = \tau_s(\nu, \theta)\varepsilon_s(\nu, \theta)B(\nu, T_s) + \int_{\tau_s}^1 B(\nu, T)d\tau + (1 - \varepsilon_s(\nu, \theta))\tau_s^2(\nu, \theta) \int_{\tau_s}^1 \frac{B(\nu, T)}{\tau^2} d\tau \quad (3.2)$$

上式中第一项是地表的出射辐射,第二项是大气发射的辐射,第三项是地表反射的大气下行辐射。其中,  $\tau_s$ 是从地面到大气层顶的透过率,  $\varepsilon_s$ 是地表发射率,  $T_s$ 是地表温度,  $\tau$ 是模式层到大气层顶的透过率,  $T$ 是模式层间的平均温度,  $B(\nu, T)$ 是环境温度为 $T$ ,频率为 $\nu$ 的普朗克函数,具体表达式为:

$$B_i(T) = \frac{c_{1,i}}{\exp\left(\frac{c_{2,i}}{a_i + b_i T} - 1\right)} \quad (3.3)$$

其中,  $i$ 代表第 $i$ 个通道,  $c_{1,i}=c_1\nu_i$ ,  $c_{2,i} = c_2\nu_i$ ,  $c_1$ ,  $c_2$ 是 Plank 常量,  $\nu_i$ 是通道 $i$ 的中心频率,  $a_i$ ,  $b_i$ 是波谱修正系数。

对于有云的阴天,假设云顶的发射率为 1,  $L^{Cld}(\nu, \theta)$ 可以写成:

$$L^{Cld}(\nu, \theta) = \tau_{cld}(\nu, \theta)B(\nu, T_{cld}) + \int_{\tau_{cld}}^1 B(\nu, T) d\tau \quad (3.4)$$

其中,  $\tau_{cld}(\nu, \theta)$ 是云顶到大气上界的透过率,  $T_{cld}$ 是云顶的温度,在 RTTOV 模式中云顶的出射率假设为 1。

对于给定的大气状态参数(大气温度、湿度和臭氧廓线)以及地表参数(地表发射率、地表气压、地表温度),沿着观测角度为 $\theta$ 的传播路径,RTTOV 可以模拟出相应模式气压层到大气层顶的通道透过率 $\tau_{v,j}$ 或是通道光学厚度 $\sigma_{v,j}$ ,其中 $\tau_{v,j} = \exp(-|\sigma_{v,j}|)$ ,卷积后得到第 $j$ 个气压层到大气层顶的光学厚度为:

$$\sigma_{v,j} = \sigma_{v,j-1} + \sum_{k=1}^M a_{v,j,k} \cdot X_{j,k}$$

其中, $X_{j,k}$ 为依赖于廓线的预报因子,根据单色光学厚度计算公式的一定函数展开预先定义, $M$ 为预报因子的个数, $a_{v,j,k}$ 为透过率计算系数。一系列大气廓线针对不同的观测角度经过精确的逐线积分模式计算后得到不同等压面上的单色透过率,利用卫星探测通道的光谱响应函数卷积后得到等压面到大气层顶的通道透过率:

$$\tau_{v,j} = \frac{\int \widehat{\tau}_{v,j} \cdot F_v \cdot d_v}{\int F_v \cdot d_v} \quad (3.6)$$

其中, $F_v$ 是通道的光谱响应函数, $\widehat{\tau}_{v,j}$ 是以波束为单位的逐线积分透过率数据集中 51 个等压面到大气层顶的单色透过率。定义线性回归方程组:

$$y_{v,j} = -\ln\left(\frac{\tau_{v,j}}{\tau_{v,j-1}}\right) = \sigma_{v,j} - \sigma_{v,j-1} \quad (3.7)$$

用于计算透过率计算系数 $a_{v,j,k}$ 。

在 RTTOV 模式中,各模式层到大气层顶的总透过率充分考虑了均匀混合气体( $\text{CO}_2$ 、 $\text{O}_2$ 、 $\text{NO}$ 、 $\text{CO}$  和  $\text{N}_2$  等)、水汽和臭氧的相互影响,体现了它在通道波谱频段上的综合吸收效应,是非单色的,其计算公式为:

$$\sigma_{i,j}^{tot} = \tau_{i,j}^{mix} \cdot \frac{\tau_{i,j}^{mix+mv}}{\tau_{i,i}^{mix}} \cdot \frac{\tau_{i,j}^{mix+mv+oz}}{\tau_{i,i}^{mix+mv}} \quad (3.8)$$

其中, $mix$ 代表均匀混合气体、 $mix + mv$ 代表均匀混合气体与水汽混合, $mix + mv + oz$ 代表均匀混合气体与水汽与臭氧的混合。上式右边为混合气体的通道透过率,采用逐线模式分别计算并在光谱响应区间内对逐线模式单色透过率进行积分得到相应混合气体的通道透过率。

RTTOV-SCATT 用来模拟云和降水对微波辐射的影响。降水在微波波段的散射影响的计算用 delta-Eddington 近似。RTTOV-SCATT 在 RTTOV 的晴空大气中添加了水或者冰的散射影响。运用两个独立的列逼近,那么云顶的总亮度温度表达为<sup>[11]</sup>:

$$T_B^{Total} = (1 - C)T_B^{Clear} + CT_B^{Rainy} \quad (3.9)$$

这里, $C$ 是垂直剖面的有效云量, $T_B$ 是亮度温度。运用上述公式计算出考虑水或冰的散射影响下总的亮度温度。

RTTOV 可以利用不同的初始输入条件模拟不同传感器在不同天气条件下大气层顶的上行辐射。具体计算流程如下:首先,当给定辐射传输模式的输入条件后,RTTOV 根据物理约束条件来判断输入的参数是否合理并计算透过率计算所需的预报因子,然后计算模式各等压面到大气层顶的各个通道的透过率,接着计算表面发射率,最后,利用简化的大气辐射方程计算到达大气层顶的向上辐射,



并根据习惯将辐射率转化为等效辐射亮温形式。

#### 4.2 模式发展现状及趋势

RTTOV 目前的最新的版本是 RTTOV V10, 是在 2011 年 1 月公布的, 下一个版本 RTTOV V11 目前正在研究中, 预计将在 2013 年发布。

RTTOV V11 将在技术方面及科学方面均作出改变。在技术方面将会有更高效的代码在超级计算机上运行。在科学方面的变化, 增加了模拟卫星的可见光和近红外通道的能力; 包含非本地的热力学平衡的短波红外通道的校正; 增加了模拟新仪器, 如 ATMS 和第三代气象卫星红外探测器的能力; 改善 PCs 对新一代红外探测器的模拟; 更新地表发射率的地图集。

RTTOV 的长期发展趋势有以下几个方面: 紫外波段的模拟能力; 改善对可见光、近红外、红外的模拟; 改善 RTTOV\_SCATT 模拟降水对微波辐射的影响; 更新 LBL 透过率数据库; 新一代近红外的系数; 更新海洋和陆地表面的发射率; 进一步更新代码<sup>[13]</sup>。

#### 5. 卫星资料同化在数值预报中的应用

近年来, 数值天气预报的准确率得到了明显的提高, 从很大程度上要归功于卫星资料的应用。图 5.1 是 ECMWF 不同资料使用情况下 500 hPa 位势高度距平相关系数的结果。从图中可以看出, 卫星资料对南半球和北半球数值预报准确率的提高都有着巨大的贡献, 其贡献甚至已经超过了探空观测资料, 特别是在南半球。南半球的预报技巧基本达到了与北半球相当的水平, 主要就是源于大量卫星资料的使用对数值预报效果的提高<sup>[14]</sup>。

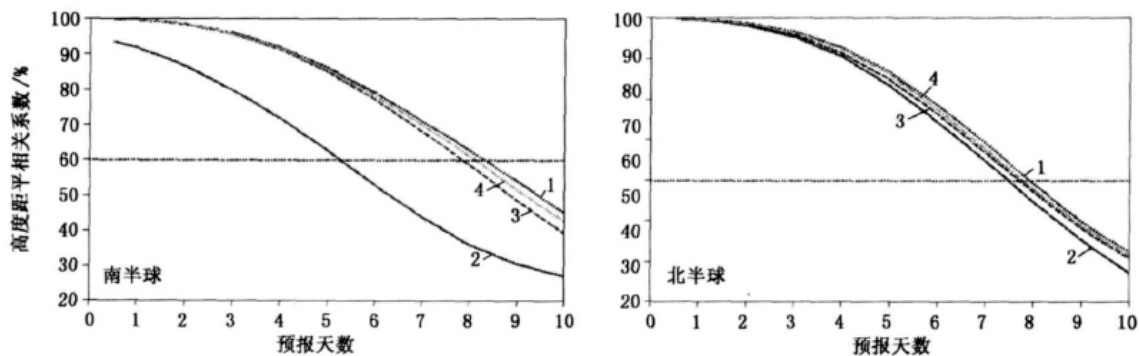


图 5.1 ECMWF 不同资料使用情况下 500 hPa 位势高度距平相关系数统计

(1 为使用全部资料, 2、3 和 4 为分别去掉了卫星资料、探空和飞机观测的结果)

全球数值预报中不使用卫星资料可使预报准确率下降 23.4%, 不使用微波或红外卫星观测资料预报准确率下降的比率分别为 13.8% 和 1%, 而不使用探空观测的 T、q、u 和 T、q 将使预报准确率分别下降 9.9% 和 2.2%。卫星资料对预报准确率的影响大大超过传统的探空观测, 而后一类观测中似乎风场观测占据更重要的地位。

微波波段与红外波段对数值天气预报的影响相比较可以看出, 在目前的技术条件下, 卫星资料的应用多是对晴空条件下的资料进行, 红外观测受云影响较大, 而微波观测可以部分穿过云区, 云区内的大气温度、湿度可以为天气系统的发生发展提供更多的信息, 对微波卫星观测的同化应用由此得到了相当的重视。

## 6. 结语

卫星资料已经大量应用于数值天气预报,占据了所用观测资料的最大份额并对数值天气预报效果的提高起着关键的作用。目前卫星资料的同化应用一方面在努力解决受地表辐射、云和降水影响卫星观测同化问题以充分利用现有卫星资料和发挥其作用,同时发展适应伴随全球观测系统建立而带来大数量和多种类新类型卫星资料的同化应用<sup>[14]</sup>。

国外对卫星探测资料在数值天气预报中的同化研究及应用开展较早,而且一直相当活跃。其研究内容涉及卫星资料的同化技术、卫星资料同化对模式分析及预报水平的作用等多个方面,业务上则已建立变分同化系统,实现了卫星资料的直接变分同化。

与国外相比,我国对数据同化的业务应用要落后许多,在卫星资料与数值天气预报系统的结合方面更是薄弱<sup>[15]</sup>。由于气象卫星在大气探测系统中的地位日渐重要我国卫星资料同化研究和应用工作的落后状况势必会影响我国业务数值天气预报的发展。

### 参考文献:

- [1]张利红, ATOVS 资料的变分同化及在暴雨预报中的应用研究[D],南京,南京信息工程大学,2006
- [2]张蕾, 奇异值分解技术在卫鼻资料反演和同化中的应用研究[D],兰州,兰州大学大气科学学院,2008
- [3]谢红琴, MM5-卫星数据变分同化方法及气象预报应用研究[D],青岛,中国海洋大学,2003
- [4]薛纪善, 气象卫星资料同化的科学问题与前景[J],气象学报,2009,67(6),903-911
- [5]潘宁, 气象卫星遥感资料在中尺度模式中的同化试验研究[D],北京,中国气象科学研究院,2001
- [6]潘宁,董超华,张王建等,变分同化及卫星资料同化[J],气象科技,2001,2,29-36
- [7]董佩明,薛纪善等,数值天气预报中卫星资料同化应用现状和发展[J],气象科技,2008,36(1),1-7
- [8]杨艳荣,面向雷电预报的雷达、卫星遥感资料同化及其应用初步研究[D],南京,南京信息工程大学,2008
- [9]孟智勇,徐祥德,陈联寿,卫星亮温资料四维同化方案及其对“7.20”武汉特大暴雨的模拟试验[J],大气科学,2002,26(9),663-676
- [10]Roger Saunders.2010, RTTOV-9 Users Guide,ECMWF Technical Memorandum
- [11]James Hocking, Peter Rayer and Roger Saunders,2011, RTTOV-10 Users Guide,ECMWF Technical Memorandum
- [12]王洪利, AMSU 资料变分同化及在暴雨数值模拟中的应用研究[D],南京,南京气象学院,2004
- [13] [http://research.metoffice.gov.uk/research/interproj/nwpsaf/rtm/rttov\\_plans.html](http://research.metoffice.gov.uk/research/interproj/nwpsaf/rtm/rttov_plans.html)
- [14]董佩明,薛纪善,黄兵等,数值天气预报中卫星资料同化应用现状和发展[J],气象科技,2008,36(1),1-6
- [15]王宗皓,卫星探测辐射率在数值天气预报中的直接应用[J],应用气象学报,1995,6(1),101-108