

文章编号: 1672-8785(2018)01-0024-07

红外卫星资料的云检测对台风数值模拟的影响

顾成明 陈 成 郭文博

(中国卫星海上测控部, 江苏 江阴 214400)

摘 要: 为提高红外卫星资料的利用率, 需将更多的资料同化进入数值预报模式初始场, 尽量减小云污染的影响。针对大气红外探测器 (Atmospheric Infrared Sounder, AIRS) 卫星资料, 用云检测方法识别了云顶高度。在验证该方法的有效性之后, 在大范围卫星视场的含云区域中保留所有云顶以上的通道, 并将这些通道的亮温数据同化进入数值预报模式初始场, 通过对比分析不同方案下台风的模拟路径来评估云检测方法对台风数值模拟的影响。结果表明, 该云检测方法的效果较好, 检测出的晴空区及云区的分布与实际观测对应, 检测得到的高云顶区域与台风云系的对应性较好。将云顶以上的通道亮温加以利用后, 红外卫星资料的利用率得到很大提高, 数据是原数据量的 2.4 倍。在台风路径模拟方面, 同化云层以上的通道数据后, 数据量的增加使路径模拟变得更精确了, 与观测值明显接近。

关键词: 云污染; AIRS; 亮温; 台风路径; 同化

中图分类号: TP7 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2018.01.004

Influence of Cloud Detection of Infrared Satellite Data on Numerical Simulation of Typhoon

GU Cheng-ming, CHEN cheng, GUO Wen-bo

(China Satellite Maritime Tracking and Controlling Department, Jiangying 214400, China)

Abstract: To improve the utilization of infrared satellite data, more data should be assimilated into the initial field of numerical forecasting mode so as to minimize the influence of cloud pollution. According to the data from Atmospheric Infrared Sounder (AIRS), a cloud detection method is used to identify Genting Height. After the validity of the method is verified, all of the channels above cloud top are retained in the cloud region of a large-scale satellite field of view and the brightness temperature data of these channels are assimilated into the initial field of the numerical prediction mode. By comparing and analyzing the simulated paths of the typhoon by different schemes, the influence of the cloud detection method on Typhoon numerical simulation is evaluated. The results show that the detection method is better in detection. The distribution of the clear sky and cloud area detected corresponds to the actual observation and the high cloud top area detected corresponds well to the typhoon cloud system. After the channel brightness temperature above cloud top is utilized, the utilization of infrared satellite data is improved greatly. The data utilized is 2.4 times as those of the original data. In typhoon path simulation, the increase in the amount of data makes the path simulation more accurate and is obviously close to the observed values after assimilation of above channel data.

收稿日期: 2017-10-14

作者简介: 顾成明(1991-), 男, 硕士, 主要研究方向为大气动力学与数值模拟。

E-mail: a1018159665@163.com

Key words: cloud pollution; AIRS; brightness temperature; typhoon path; assimilation

0 引言

目前, 影响数值模式预报精度的两个重要因素就是数值预报模式本身和预报模式的初始场。随着理论技术的不断完善, 数值预报模式已经日趋完善, 许多研究都致力于模式初始场的改进。将卫星资料同化到模式初始场以得到一个更加精确的初始场正是卫星资料应用的一个重要方面。

高光谱红外卫星资料不仅具备通常卫星资料扫描范围广、水平分辨率高的特点, 其高测量精度和高光谱分辨率的特性决定了其具有较高的垂直分辨率, 能够对整层大气垂直高度上的气象要素进行精细化探测。然而, 红外辐射无法穿透云层, 无论是上行还是下行红外辐射都会被云层阻隔。如果绘制垂直大气中红外辐射的传播图, 会发现云对红外辐射的截断作用十分明显。因此, 如果视场中有云存在, 云层下方大气的红外辐射就无法被探测, 导致卫星提供的红外辐射亮温值与实际值偏差较大。云对红外辐射的这种干扰称为云污染。

为了充分利用红外卫星资料, 必须解决云污染问题。目前, 解决红外辐射资料云污染的问题主要有以下几种方法^[1]: 只选择晴空资料法、将云污染影响取出法、选择不受云污染的通道法、发展能计算云对红外辐射率影响的辐射模式和它的伴随算子方法。王云峰等^[2]提出了基于空间梯度信息对 AIRS 资料进行质量控制的方法, 剔除某些可能受到云污染或复杂下垫面造成的误差较大的资料, 以保证同化分析效果。Mc Nally 等^[3]开发了一个能够同化 AIRS 资料的系统以用于云污染检测、偏差订正和观测误差订正等。经试验证明, 在欧洲中期天气预报中心(European Centre For Medium Range Weather Forecasts, ECMWF)的同化系统中同化 AIRS 资料可改进分析场, 提高预报质量。针对 AIRS 资料中的陆地和海表视

场, Goldberg 等^[4]提出了 NESDIS-Goldberg 云检测方案。陈靖等^[5]结合 GRAPES 系统和 AIRS 仪器特征, 对 AIRS 云污染视场的数据进行了剔除。郭兴亮等^[6]对 CRTM(Community Radiative Transfer Model)模式中的辐射传输模块进行了修改, 并提出了能够模拟云区红外辐射的 CRTM 云模式。

综上所述, 在对红外高光谱卫星资料进行同化的过程中, 无论是仅同化晴空资料、剔除云污染, 还是为了开发针对云区亮温模拟的辐射传输模式, 都必须首先进行云检测以区分晴空区及云区, 或者确定云顶高度。本文采用 Mc Nally 的红外卫星资料云检测方法^[7]识别出云顶高度, 以便保留云顶以上的 AIRS 亮温资料。通过专门的云检测试验判别其有效性后, 将模拟的云顶以上通道亮温数据同化到台风初始场中。然后, 将同化了云区亮温的初始场提供给数值预报模式, 进行台风的数值模拟, 最后对比验证此方法的有效性。

1 模式与资料介绍

1.1 CRTM 快速辐射传输模式

CRTM 是美国卫星资料联合同化中心近年来开发建立的一个快速辐射传输模式。该模式在现有卫星资料同化系统中充当正向算子, 模拟云区亮温, 其模拟结果对卫星资料同化效果有重要影响。

该模式提供了各种微波和红外卫星传感器的参数信息, 在运行模式进行正演计算时, 只要提供大气状态廓线、下垫面参数、云和气溶胶参数, 就可以模拟特定卫星传感器各通道高度的辐射信息和亮温值。该模式除了包含进行正演计算的 Forward 模块, 还包含了切线性模块、伴随和 K 矩阵模块, 后者是用来计算通道亮温对所提供大气状态变量的偏导。

1.2 红外高光谱卫星资料介绍

AIRS 被称为光栅式红外大气探测器, 搭

载于美国地球观测系统(Earth Observation System, EOS)的第二颗 Aqua 卫星上,其光谱分辨率^[8],每 2.667 s 横向扫描 1 次,扫描角为 49.5°,可覆盖地球表面 1650 km 的长度。每条扫描线有 90 个观测视场,每个视场包含 2378 个光谱取样^[9]。AIRS 星下点的水平分辨率为 13.5 km,垂直分辨率为 1 km,能够提供从地面到 40 km 高度的大气信息,具有高测量精度和高光谱分辨率的特性,第一次真正意义上实现了对大气、海洋环境的高光谱分辨率大气红外探测^[10]。它不但使大气探测的垂直分辨率以及反演精度上了一个台阶,还为其他高光谱卫星资料的处理和应用奠定了基础。

2 云检测方法介绍

本文借鉴了 McNally 的红外卫星资料云检测方法^[7]来识别云顶高度。对于含云的卫星视场而言,AIRS 资料能提供一组观测通道亮温值,同时将该视场同一时刻的大气温压湿状态廓线输入快速辐射传输模式中,设定参数为晴空状态,模拟得出一组晴空通道数据。将这两组亮温值作差,得到一组偏差值,云的信息就包含在这一组偏差值中。通过对其进行分析计算,

可得出云顶高度。具体步骤总结如下:

(1)将同一视场垂直各通道的模拟亮温值与观测含云亮温值作差;

(2)将偏差值按该各通道受不同高度云的影响程度重新排序;

(3)将重新排序后的偏差值截成 5 个不同的光谱吸收带,分开排列;

(4)对各吸收带的偏差点列进行低通滤波处理,平滑滤去噪声;

(5)各吸收带中,从偏差值最大的末位通道开始,依次向前判断偏差矢量的梯度和偏差矢量的绝对值。若偏差矢量的这 2 项指标中任一值大于预先给定的阈值,则进行下一通道的判断;若任一值均小于阈值,则将该通道称为临界通道,该通道的高度即为云顶高度。

3 云检测试验

试验选取初始场时刻为 2012 年 8 月 1 日 06 时的台风“达维”,同化 AIRS 卫星资料时拟采用的视场点分布如图 1(a)所示。图 1(b)是 AIRS 卫星资料提供的该时刻的云量分布,单位为百分比。图 1(c)是利用上文阐述的云检测方法得到的云顶高度分布,单位为 hPa。图 1

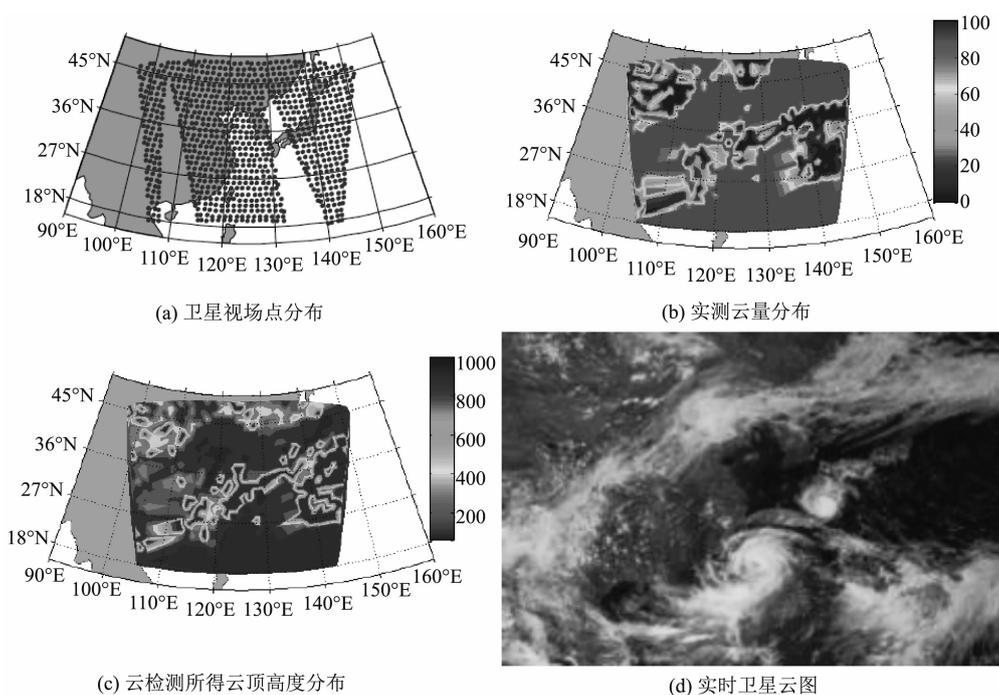


图 1 台风“达维”

(d)是该时刻该区域的卫星云图。将云检测得到的云顶高度分布与实测的云量和云图对比分析,发现存在着较好的一致性。位于日本西南部的圆状云块和福建东南侧海面的台风中心在云顶高度分布图上的表现为云顶高度较高的区域,从日本北部一直延伸至华中地区的云带在云顶高度分布图上的表现也很明显,黄海和日本南侧太平洋海域的大片晴空区在云顶高度分布图上也清晰可见。定量来看,经统计,实测的云量分布图中,晴空视场数占总视场数的 14.79%,而云检测出的晴空视场数占总视场数的 11.74%,二者比较接近。

4 台风数值模拟试验

4.1 方案设计

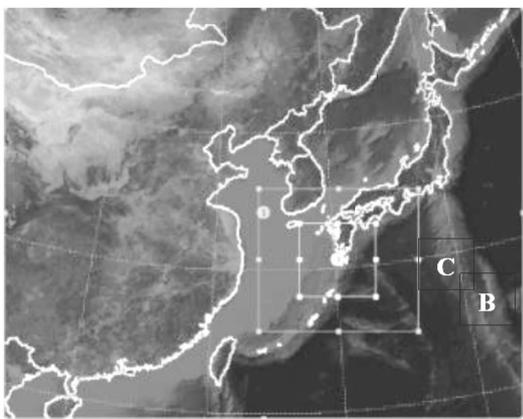


图 2 台风“达维”模式区域设置,区域 A 是固定的,区域 B 和 C 用涡度跟随算法沿台风路径自动移动

模拟时段为 2012 年 8 月 1 日 06 时~3 日 12 时。模拟采用三重移动嵌套(图 2),最外层中心为(34.0°N, 124.2°E),水平网格数分别为 95×76、88×79 和 127×121,网格距分别为 45 km、15 km 和 5 km,积分时间步长分别为 90 s、30 s 和 10 s。垂直层数为不均匀的 35 层,分别是 1.000、0.993、0.983、0.970、0.954、0.934、0.909、0.880、0.845、0.807、0.765、0.719、0.672、0.622、0.571、0.520、0.468、0.420、0.376、0.335、0.298、0.263、0.231、0.202、0.175、0.150、0.127、0.106、0.088、

0.070、0.055、0.040、0.026、0.013、0.000。模式层顶为 10 hPa。物理过程采用 Thompson graupel 云微物理方案、快速辐射传输模式(Rapid Radiative Transfer Model, RRTM)长波辐射方案、Goddard 短波辐射方案、YSU (Yonsei University)边界层方案和 Kain-Fritsch(new Eta)积云对流参数化方案等。

表 1 数值试验方案

	试验方案	初始场
控制试验	CTRL	NCEP
同化试验 1	AIRS	NCEP+AIRS
同化试验 2	AIRS_cloud	NCEP+AIRS

为了检验将云顶以上通道亮温值同化进入台风初始场后的效果,本文设计了三组试验:(1)控制试验(CTRL),不同化任何观测资料;(2)同化试验 1(AIRS),利用 WRFDA 系统直接同化晴空区 AIRS 亮温资料;(3)同化试验 2(AIRS_cloud),利用 WRFDA 系统直接同化晴空区域以及云顶以上 AIRS 亮温资料。将同化时间窗口设定为[-3 h, 3 h],同化试验在外层区域进行,内层区域的初始条件通过从外层区域插值获取。详细试验方案见表 1。

4.2 同化进入初始场的 AIRS 资料对比分析

AIRS_cloud 试验同化的资料数是 AIRS 试验的 1.6~3.8 倍不等,主要表现为地面通道同化的资料数较少,通道高度越高,同化的资料数目越多。经统计,AIRS 试验同化的资料数为 6327 个,占总资料数的 8.11%;AIRS_cloud 试验同化的资料数为 15134 个,占总资料数的 19.41%。AIRS_cloud 试验同化的资料数目是 AIRS 试验的 2.39 倍。卫星资料利用率的大大提高,对初始场精度的提升将起到重要作用。

为了更好地分析同化资料点数的垂直分布,图 3 给出了两种试验位于典型高度处的通道(300 hPa、400 hPa、500 hPa、600 hPa、750 hPa、950 hPa、1000 hPa)所同化的资料点垂直分布。两种试验都是通道高度越高,同化

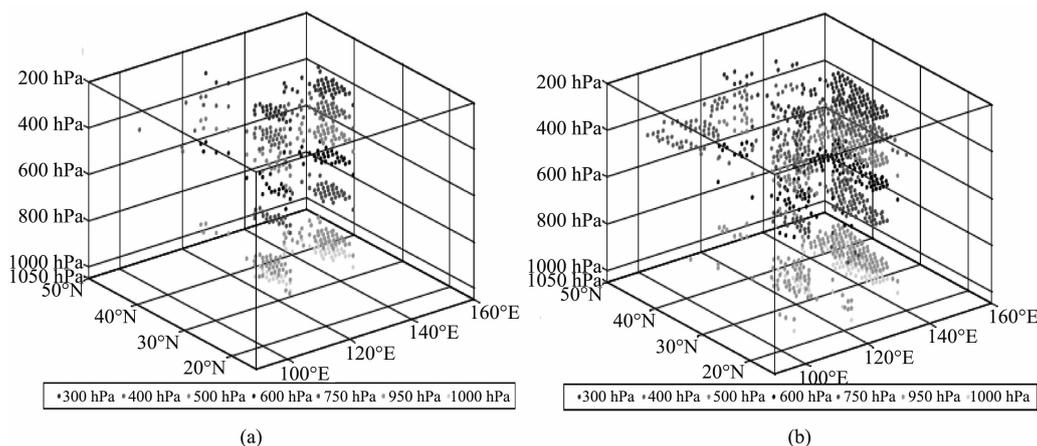


图3 两种试验同化的资料点在典型高度处垂直分布(a)AIRS 试验(b)AIRS_cloud 试验

的资料数目越多,并且层数越靠上,AIRS_cloud 试验比 AIRS 试验同化的资料数目越多,与上一段得出的结论一致。这是因为地面通道受下表面的影响大,容易产生误差,有许多资料是被天气研究和预测模型数据同化系统(Weather Research and Forecasting model Data Assimilation System, WRFDA)自带的质量控制方法剔除的,而高度较高的通道则主要受云的影响。CRTM 云模式能够模拟受云影响的亮温,这些资料也就被同化进来,所以 AIRS_cloud 试验同化的资料在高度较高的通道比 AIRS 试验要多得多。

为分析同化资料点数的水平分布,对比两种试验中位于典型高度处的通道(300 hPa、600 hPa、1000 hPa)所同化的资料点水平分布以及初始场时刻的卫星云图(图略)。晴空区主要位于我国东部陆地、黄海、日本海、日本东南部洋面和海南岛地区。对于高度较高的 300 hPa 和 600 hPa 两个通道而言,与 AIRS 试验中同化的资料相比,AIRS_cloud 试验在海南岛周围和日本东南部洋面同化了更多的晴空区资料,并且在黑龙江和我国东部陆地也有零星的数据进入同化系统,这些点在 AIRS 试验中均被当做受云污染的点被剔除掉。对于地面通道,AIRS_cloud 试验同化的位于日本东南部洋面的晴空区资料更多,但是在黑龙江和我国东部陆地并没有更多的资料点进入了同化系

统,这主要是因为地面通道亮温受地表温度、类型等因素的影响,误差较大,被其他质量控制方法剔除了,与云污染无关。

4.3 对台风路径及强度的影响

图4描述的是各组试验台风路径的模拟情况。CTRL 试验模拟得出的台风移动与实际相比整体偏南,特别是 30 h 后的移动路径与实际观测路径的偏差较大。AIRS 和 AIRS_cloud 试验得出的路径走势在前 18 个小时与实际比较接近,18 个小时之后,AIRS 模拟的路径开始整体偏南,并且移速加快,与实际路径的偏差不断增大。而 AIRS_cloud 试验模拟的台风路径不论是移动速度还是路径走势与实际台风都比较接近,台风登陆点的距离也与实测的登陆点很近。可见,AIRS_cloud 试验在台风路径的模拟方面效果较好。

图5给出了各组试验所模拟的台风路径与

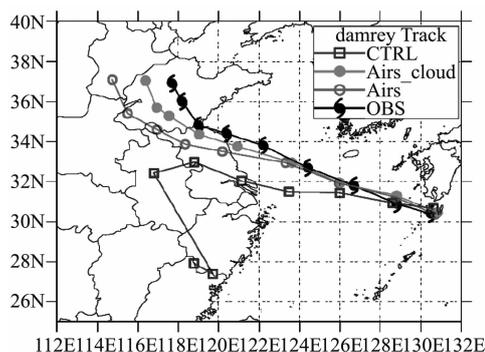


图4 各组试验模拟的台风路径及观测路径

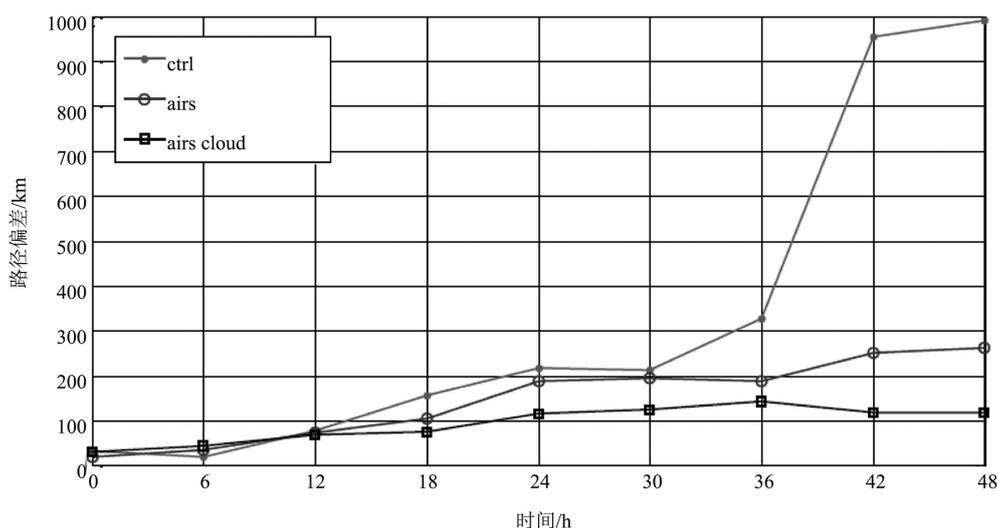


图 5 各组试验模拟的台风路径与实况间的偏差情况(单位: km)

实况之间在各个时次的偏差。由图 5 可见, CTRL 试验在前 3 个时次与实际路径的偏差还较小, 之后的偏差都比较大, 特别是最后 3 个时次的偏差明显开始增大, 最后达到了 1000 km。从第 3 个时次开始, 与 AIRS 试验相比, AIRS_cloud 试验模拟的台风路径的偏差明显较小, 始终在 150 km 以内。而 AIRS 试验的偏差基本都在 200 km 以上。在模拟的最后一个时次中, AIRS_cloud 试验的偏差仅为 100 km, 而 AIRS 试验的偏差达到了 280 km 左右。可见 AIRS_cloud 试验模拟的台风路径偏差最小, 模拟的路径移动走势最好。

进一步分析“改善比”(指相对于 AIRS 试验, AIRS_cloud 试验模拟的路径偏差减小和增大的预报时次之比, 其中若偏差为 0, 视为增大), 如图 6 所示。AIRS_cloud 试验的改善比为 7:2, 最大改善距离约为 140 km, 最后两个时次的改善距离都超过了 120 km, 最大误差距离(偏差增大)约为 10 km。由此可见, 采用 CRTM 云模式正演模拟亮温同化 AIRS 资料, 能够较好地改善同化效果, 提高台风的路径模拟精度。

5 结论

云区卫星资料的同化一直都是卫星资料同化的难点, 特别是对于红外资料, 大气红外遥

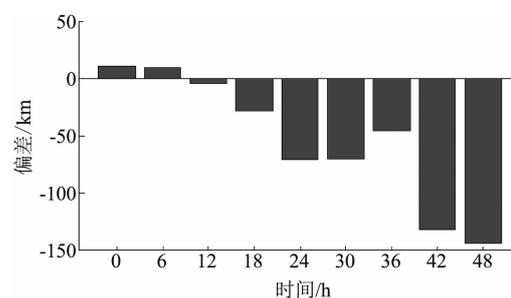


图 6 AIRS_cloud 试验与 AIRS 试验的“改善比”(单位: km)

感的特性决定了红外高光谱资料很容易受云污染的影响, 导致大量的云区红外资料不可用, 因此目前基本上都只同化晴空区的卫星资料。为了提高红外卫星资料的利用率, 本文参考 McNally 的红外卫星资料云检测方法获取云顶高度, 通过与实测的云量和卫星云图的对比分析验证检测效果。随后利用 WRFDA 同化系统将云顶以上的通道亮温数据同化进入模式初始场, 最后利用该初始场进行台风数值模拟, 从而对比验证该方法的有效性。主要结论如下:

(1) 将 McNally 的红外资料云检测方法运用于卫星初始场实例后发现, 该云检测方法的效果较好, 云区和晴空区的分布与实时卫星云图的对应性较好。检测出的晴空视场比例与利用实测云量得到的晴空视场比例比较接近, 并且符合相关的研究结论, 即 AIRS 探测视场中

完全晴空的视场大约占 10%。

(2)与仅保留晴空亮温数据的 AIRS 试验相比,同化了云顶以上亮温数据的 AIRS_cloud 试验使用的资料数是前者的 2.4 倍,大大提高了 AIRS 卫星资料的利用率。

(3)与 AIRS 试验相比, AIRS_cloud 试验能够较好地改善台风路径的模拟效果,得到的路径走势与实测路径更接近。这证明同化云顶以上 AIRS 通道亮温数据之后,数据量的增加对于台风路径模拟的改进作用很明显。

参考文献

- [1] 皇群博. 云水污染的卫星微波资料变分同化技术 [D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2011.
- [2] 王云峰, 张晓辉, 李运飞, 等. 基于空间梯度信息的质量控制方法在红外高光谱 AIRS 资料同化中的应用研究 [J]. *大气科学*, 2015, **39**(2): 303-314.
- [3] McNally A P, Watts P D, Smith J A, et al. The Assimilation of AIRS Radiance Data at ECMWF [J]. *Quart J Roy Meteor Soc*, 2006, **132**(616): 935-957.
- [4] Goldberg M, Qu D Y, Mcmillin L M, et al. AIRS Near-real-time Products and Algorithms in Support of Operational Numerical Weather Prediction [J]. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 2003, **41**(2): 379-388.
- [5] 陈靖, 李刚, 王根. 一个基于视场的 AIRS 云检测方案 [J]. *安徽农业科学*, 2010, **38**(7): 3848-3849.
- [6] 郭兴亮, 周育峰, 王云峰, 等. CRTM 云模式的建立与敏感性试验 [J]. *红外*, 2016, **37**(10): 10-16.
- [7] McNally, Watts P D. A Cloud Detection Algorithm for High-spectral-resolution Infrared Sounders [J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2003, **129**(595): 3411-3420.
- [8] Zhang P, Pascal B, Dong C H. Study of Hyperspectral IR Atmospheric Sounding with an Accurate forward Simulation [J]. *Journal of Infrared & Millimeter Waves*, 2005, **24**(6): 414-418.
- [9] 刘旸, 蔡波, 班显秀, 等. AIRS 红外高光谱资料反演大气水汽廓线研究进展 [J]. *地球科学进展*, 2013, **28**(8): 891-896.
- [10] Aumann H H, Chahine M T, Gautier C, et al. AIRS/AMSU/HSB on the Aqua Mission: Design, Science Objectives, Data Products, and Processing Systems [J]. *IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing*, 2003, **41**(2): 256-264.

(上接第 7 页)

参考文献

- [1] 李相贤, 徐亮, 高闽光, 等. 分析温室气体及碳同位素比值的傅里叶变换红外光谱仪 [J]. *光学精密工程*, 2014, **22**(9): 2359-2368.
- [2] 粘伟, 刘兆军, 林喆, 等. 傅里叶光谱仪的光程扫描控制系统设计 [J]. *红外与激光工程*, 2013, **42**(8): 2085-2091.
- [3] 罗海燕, 李双, 施海亮, 等. 空间外差光谱仪成像光学系统设计 [J]. *红外与激光工程*, 2016, **45**(8): 221-226.
- [4] 翁诗甫. 傅立叶变换红外光谱分析(第二版) [M]. 北京: 化学工业出版社, 2010.
- [5] Luca Palchetti, Monica Olivieri, Carlo Pompei, et al. The Far Infrared FTS for the FORUM Mission [C]. Leipzig: OSA Light, Energy and the Environment Congress, 2016.
- [6] 宋菲君, Jutamua S. 近代光学信息处理(第二版) [M]. 北京: 北京大学出版社, 2014.
- [7] Grant R F. Introduction to Modern Optics (Second Edition) [M]. New York: Dover Publications, 1975.
- [8] 周世椿. 高级红外光电工程导论 [M]. 北京: 科学出版社, 2014.
- [9] 段娟, 华建文, 王战虎, 等. 重力对星载傅里叶光谱仪动镜系统的影响 [J]. *光学精密工程*, 2015, **23**(9): 2613-2619.
- [10] 张磊, 杨敏珠, 邹曜璞, 等. 红外傅里叶光谱仪的仪器线形函数及工程应用 [J]. *光学精密工程*, 2015, **23**(12): 3323-3328.