

“珍珠”台风卫星红外通道亮温的数值模拟

丁伟钰 万齐林

中国气象局广州热带海洋气象研究所, 中国气象局热带季风重点开放实验室, 广州 510080

摘 要 热带地区云的覆盖率高, 卫星辐射资料特别是红外通道的数值模拟容易受到云的影响, 提高台风等热带天气系统卫星亮温资料的模拟能力, 有助于热带地区数值模式的检验以及提高卫星资料直接同化的水平。首先, 利用天气研究和预报模式 (Weather Research and Forecasting Model, 简称 WRF) 对“珍珠”台风的三维气象场, 包括云结构特征, 进行了模拟, 并诊断分析了总云量、云顶气压等物理量; 然后, 结合快速辐射传输模式 (fast radiative transfer model for TOVS, 简称 RTTOV) 8.7 版对“珍珠”台风的高分辨率红外辐射探测仪 3 型 (High Resolution Infrared Radiation Sounder, 简称 HIRS/3) 红外辐射亮温进行了模拟, 并且比较了有云和无云条件下的模拟结果。结果表明, 如果不考虑云的影响, RTTOV 模式无法模拟出台风的结构特征; 结合三维云特征的模拟量, RTTOV 模式可以较好地模拟出 HIRS/3 第 4~10、13~19 通道的辐射亮温。加入云结构特征对峰值能量高度在云层以下的红外通道的模拟有正面影响, 该方案既可以作为检验模式模拟的一种手段, 同时也表明红外资料在热带天气系统的资料同化领域具有潜在的应用能力。

关键词 “珍珠”台风 高分辨率红外辐射探测仪 3 型红外通道 快速辐射传输模式

文章编号 1006-9895 (2008) 03-0572-09

中图分类号 P405

文献标识码 A

The Simulation of Typhoon Chanchu Infrared Channels Brightness Temperature

DING Wei-Yu and WAN Qi-Lin

Guangzhou Institute of Tropical and Marine Meteorology/Key Open Laboratory for Tropical Monsoon, China Meteorological Administration, Guangzhou 510080

Abstract The high cloud coverage in the tropics makes it easier for numerically simulated satellite radiation data, especially those in the infrared channels, to be subject to clouds. Improved simulation of satellite-derived temperature of brightness blackbody (TBB) data for tropical synoptic systems helps to verify numerical models for the tropics and improve the direct use of satellite information in assimilation. The work first uses the Weather Research and Forecasting (WRF) model to simulate the three-dimensional meteorological field of typhoon Chanchu, including the cloud structure, and physical quantities, such as total cloud fractions and cloud top pressure, are diagnostically studied. Then, version 8.7 of a fast radiative transfer model for TIROS Operational Vertical Sounder (RTTOV) is used to simulate the infrared TBB of the storm measured with the High resolution Infrared Radiation Sounder (HIRS) and simulations are compared for conditions with and without clouds. It is shown in the results that the RTTOV model cannot simulate the structure of Typhoon Chanchu accurately and the simulated temperature is generally higher than the observation if the cloud effect is not taken into account under such extreme condition as the typhoon. By including the three-dimensional structure of clouds simulated by meteorological models, the RTTOV model can simulate the spiral structure on the infrared channels of HIRS/3 (like channels 4-10 and channels 13-19). Clouds

收稿日期 2006-12-26, 2007-04-26 收修定稿

资助项目 “十一五”国家科技支撑计划重点项目 2006BAC02B, 广东省自然科学基金项目 7035011, 中国气象局新技术推广重点项目 CMATG2006Z09, 广东省气象局科技研究 200512

作者简介 丁伟钰, 男, 1973 年出生, 副研, 从事热带气象预报技术工作。E-mail: wyding@grmc.gov.cn

have positive effect on the simulation of infrared channels that altitudes of peak energy are below the cloud layers.

The TBB simulated with the scheme in this paper reproduces the structural characteristics of the typhoon and is well correlated with the observation. It shows that the scheme is one of the ways to verify model simulation. TBB of some infrared channels has the potential applicability in data assimilation of tropical synoptic systems.

Key words Typhoon Chanchu, HIRS/3 infrared channel, fast radiative transfer model for TIROS Operational Vertical Sounder

1 引言

卫星资料在气象领域发挥了越来越重要的作用^[1],可见光、红外、微波等卫星观测资料广泛应用于数值天气预报^[2]、天气分析^[3]、气候变化分析^[4]、环境监测^[5]等方面。卫星辐射亮温的数值模拟既是检验模式模拟结果的一种方法,也是卫星辐射资料的直接同化中重要的环节。直接同化卫星辐射或亮温资料,通常都采用辐射传输模式作为观测算子来模拟不同通道的卫星辐射亮温^[6],辐射传输模式的模拟能力将直接影响同化结果。由于缺乏三维的云信息,因此目前卫星资料的直接同化大多基于晴空条件,即在同化之前进行严格的质量控制,剔除受云雨影响的观测资料。由于微波资料受到云的影响相对较小,所以不少微波资料可以被同化到数值模式之中,例如,Derber 等^[7]将 TIROS 业务垂直探测仪(TIROS Operational Vertical Sounder,简称 TOVS)晴空辐射资料直接同化到 NCEP 同化系统之中,提高了模式的预报技巧。张华等^[8]基于全球/区域同化预报系统(Global and Regional Assimilation and Prediction Enhanced System,简称 GRAPES)三维变分同化系统,利用辐射传输方程作为观测算子直接同化了改进的微波探测装置(Advanced Microwave Sounding Unit,简称 AMSU)资料,改进了台风路径预报。Kozo 等^[9]在 NCEP 的全球模式中同化了特别微波成像辐射计(Special Sensor Microwave Imager,简称 SSM/I)辐射资料。

红外观测与微波观测具有不同的特点,由于红外波段无法穿透云层,因此它对云的整体特征十分敏感^[10],Rossow^[11]和 Vukicevic^[12]等的研究成果也证实了红外观测资料对有云区域云整体特征的反

演有一定效果。红外资料受到云的影响较大,并且热带地区云的覆盖率很高,台风、暴雨等极端天气过程都与云雨过程密不可分。如果仅考虑晴空条件下的辐射传输过程,那么大量的卫星观测资料,特别是红外通道资料,都无法在热带地区资料同化过程中应用。由于随着数值模式技术的发展,云的中尺度结构特征的预报能力有了进一步提高,预报云物理量的三维结构成为可能。李昀英等^[13]比较了数值模式输出云参数与 ISCCP 卫星反演云参数,表明数值模式可以反映中国东部冬季云的基本分布特征。Thomas 等^[14]利用辐射传输模式、气体消光模式和云模式构造了全天气条件下的辐射资料同化的观测算子,由云模式来提供辐射传输模式需要的云物理量信息。Chevallier 等^[15]利用数值模式输出的云物理量信息以及快速辐射传输模式(fast radiative transfer model for TOVS,简称 RTTOV)成功模拟了有云条件下静止卫星 11 μm 通道亮温。马刚等^[16]详细分析了 RTTOV5 模拟 NOAA-14 卫星 19 个高分辨率红外辐射探测仪(High Resolution Infrared Radiation Sounder,简称 HIRS)通道亮温的误差,指出误差与大气廓线参数有密切关系。然而对于台风这种极端天气过程,目前尚不清楚云对卫星红外通道的模拟有多大的影响。本文基于 WRF 数值模式和 RTTOV87 辐射传输模式,模拟了 NOAA-16、17 的 HIRS/3 仪器观测的“珍珠”台风亮温,并比较了有云和无云条件下模拟结果。

2 模式及资料介绍

RTTOV 是 20 世纪 90 年代初^①由 ECMWF 开发的用于模拟 TOVS 的快速辐射传输模式,经过多年的改进^②,目前已经发展成为模拟多种气

① Eyre J R. A fast radiative transfer model for satellite sounding systems. ECMWF Research Dept. Tech. Memo. , 1991, 176pp

② Matricardi M, Chevallier F, Tjemkes S. An improved general fast radiative transfer model for the assimilation of radiance observations. ECMWF Research Dept. Tech. Memo. 345 transfer model for the infrared atmospheric sounding interferometer. ECMWF Research Dept. Tech. Memo. , 2001. 425pp

象卫星探测的地球环境红外和微波辐射的快速辐射传输模式系统。由于其计算速度较快,在气象卫星资料同化领域有广泛的应用,ECMWF 的资料同化业务系统以及我国自主开发的 GRAPES 三维变分同化系统都是采用 RTTOV 辐射传输模式作为观测算子。本文采用 RTTOV8.7 版本,可以对 3~20 μm 波段的红外通道以及 10~200 GHz 通道的微波通道进行模拟。大气顶层向上的辐射可以被描述为

$$L(\nu,\theta) = (1 - N)L_{\text{Clr}}(\nu,\theta) + NL_{\text{Cld}}(\nu,\theta), \quad (1)$$

其中, ν 表示卫星观测通道的频率, θ 为观测角度, L_{Clr} 为晴空大气层顶向上辐射, L_{Cld} 为云顶到大气层顶向上辐射, N 表示云量。RTTOV 模式用公式 (1) 分别计算每一层云的向上辐射, 然后进行累加, 这样就将半透明云层辐射计算过程转换为晴空条件下辐射与各黑体云层辐射的线性累加过程。在红外区, 云光学特性的参数化是依照 Liebe^[18] 的冰粒方案和 Smith 等^[19] 的水滴方案进行的, 高低云层之间的交叠方案对模拟结果有直接影响, RTTOV 模式采用 Raisanen^[20] 提出的云重叠假设, 该方案可以详细区分各云层的水平覆盖和发射率。为了简化计算, RTTOV 模式没有考虑云散射过程, 这可能会导致高层薄云的模拟亮温略微偏高^[15]。RTTOV 模式的输入参数包括: 大气温度廓线、吸收气体廓线, 云以及地表特征。目前吸收气体包括: 水汽 (H_2O)、臭氧 (O_3) 以及二氧化碳 (CO_2)。当模拟有云条件下大气顶层向上的辐射时, 需要提供云水含量、云冰水含量、云量的垂直廓线以及总云量、云顶气压作为输入参数。近年来, 随着气象模式微物理过程技术的发展, 区域中尺度气象模式对云的三维结构有了一定的预报能力, 可以利用模式模拟的云的三维结构以及其他物理量信息, 通过 RTTOV 辐射传输模式对有云条件下的辐射亮温进行模拟。

NOAA-16 和 NOAA-17 属于美国第五代极轨气象卫星, 卫星上携带有 HIRS/3 仪器, 该仪器有 20 个通道, 其中 1 个可见光通道 (0.69 μm)、7 个短波通道 (3.7~4.6 μm)、12 个长波通道 (6.7~15 μm)。各通道的特点如表 1 所示。HIRS/3 具有较高的空间分辨率, 其观测通道非常具有代表性, 在云监测、大气廓线反演等方面有广泛的应用。RTTOV 模式可以对其中 19 个通道 (长波通道和

表 1 NOAA-16 和 NOAA-17 HIRS/3 仪器各通道主要特点
Table 1 NOAA-16 and NOAA-17 HIRS/3 spectral characteristics for different channels

序号	波长/ μm	主要吸收成分	峰值能量高度	主要用途
1	14.95	CO_2	30 hPa	大气温度廓线
2	14.71	CO_2	60 hPa	
3	14.49	CO_2	100 hPa	
4	14.22	CO_2	400 hPa	
5	13.97	CO_2	600 hPa	
6	13.64	$\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}$	800 hPa	
7	13.35	$\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}$	900 hPa	
8	11.11	窗区	地表	表面温度
9	9.71	O_3	25 hPa	臭氧总含量
10	12.47	窗区	地表	表面温度
11	7.33	H_2O	700 hPa	水汽廓线
12	6.52	H_2O	500 hPa	
13	4.57	N_2O	1000 hPa	大气温度廓线
14	4.52	N_2O	950 hPa	
15	4.47	$\text{CO}_2/\text{N}_2\text{O}$	700 hPa	
16	4.45	$\text{CO}_2/\text{N}_2\text{O}$	400 hPa	
17	4.13	CO_2	地表	
18	4.00	窗区	地表	表面温度
19	3.76	窗区	地表	
20	0.69	窗区	云	云

短波通道) 进行模拟。2006 年 5 月 14 日 19 时 (国际协调时, 下同) 和 15 日 02 时, NOAA-16 和 NOAA-17 卫星分别经过“珍珠”台风上空。本文对这两个时刻 HIRS/3 的辐射亮温资料进行了模拟。

本文用 WRF 模式对台风“珍珠”进行了模拟, 采用 NCEP $1^\circ \times 1^\circ$ 再分析资料作为模式的初始场和边界场, 启报时间为 2006 年 5 月 14 日 00 时, 模式分辨率为 15 km, 云微物理参数化使用 WRF Single-Moment 5-class scheme, 该方案考虑水汽、云、水、雨水、云冰及雪, 并且水、冰可以共存, 采用该方案可以提供云水含量、云冰含量、云量的三维预报场。图 1 给出了 2006 年 5 月 14 日 19 时模式预报的云水含量、云冰水含量和云量沿 14°N 垂直剖面图。由于该剖面经过台风中心位置, 因此在 115°E 附近有台风眼存在。台风眼附近只有少量低云, 台风主体云系位于 400~100 hPa 附近, 外围云系位于 300~150 hPa 附近, 台风云系呈螺旋状分布。图 2 为 5 月 15 日 02 时, 模式预报的云水含

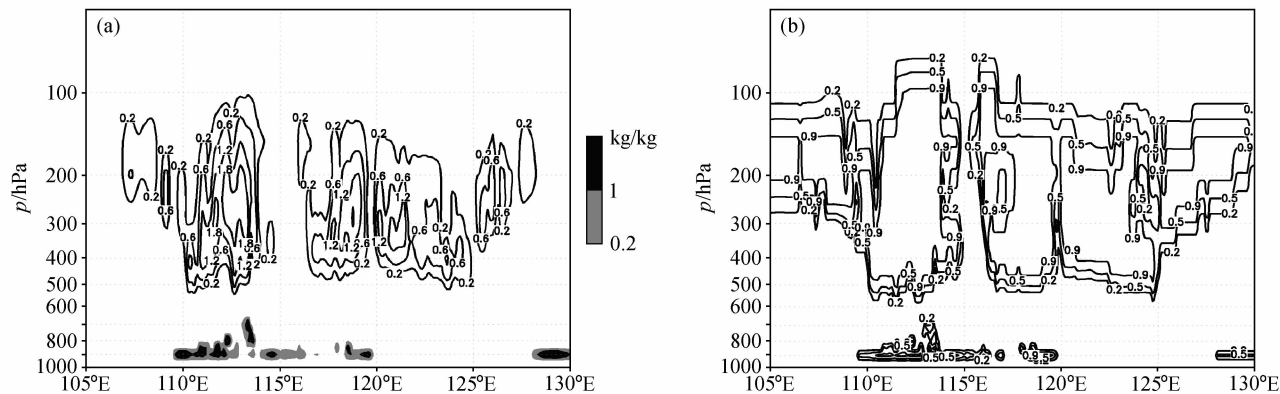


图1 2006年5月14日19时云水含量(阴影)、云冰水含量(等值线)(a, 单位: kg/kg)以及云量(b)沿14°N垂直剖面图

Fig.1 Vertical cross sections of (a) cloud water content (shadow), cloud ice water content (contour) (kg/kg) and (b) cloud cover fraction along 14°N at 1900 UTC 14 May 2006

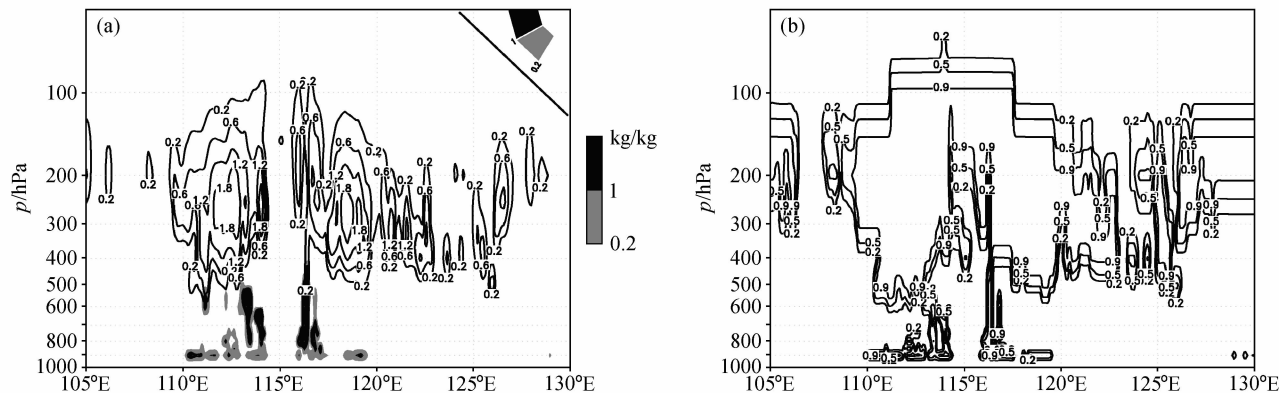


图2 2006年5月15日02时云水含量(阴影)、云冰水含量(等值线)(a, 单位: kg/kg)以及云量(b)沿14.2°N垂直剖面图

Fig.2 Vertical cross sections of (a) cloud water content (shadow), cloud ice water content (contour) (kg/kg) and (b) cloud cover fraction along 14.2°N at 0200 UTC 15 May 2006

量、云冰水含量和云量沿14.2°N垂直剖面图。该剖面图同样经过了台风中心,可以发现台风中心仍然位于115°E附近,但是台风眼高层100~200 hPa附近有高云存在。

定义云顶和云底位置的云量是垂直方向上最大云量的50%,根据该定义可以确定云顶和云底的位置。总云量的计算是根据云顶和云底之间各层云量的体积平均,即

$$f_{cT} = \frac{\sum_{K_b}^{K_t} f_{ck} \Delta z_k}{\sum_{K_b}^{K_t} \Delta z_k}, \quad (2)$$

其中, K_t 和 K_b 分别指云顶和云底位置的垂直层次, f_{ck} 表示第 k 层的云量, Δz_k 表示第 k 层的厚度。

从2006年5月14日19时云顶气压和总云量沿14°N的剖面图(图3)可以发现,台风眼位置云

量少,云顶高度明显比周围低,外围云系呈螺旋状分布。15日02时由于在台风眼高层有高云存在,因此从云顶气压和总云量的剖面图上看不到明显的台风眼,但是仍然可以反映出外围气压的螺旋分布(图略)。

3 结果分析

为了比较云参数在模拟过程中的作用,设计了两组试验。输入参数如表2所示,试验2为有云参数的试验。两次试验都没有考虑除水汽以外的其他吸收气体的影响。试验区域为(5°N~25°N, 105°E~130°E),在这个范围内,2006年5月14日19时NOAA-16卫星一共有2856个HIRS/3仪器的有效观测点,2006年5月15日02时NOAA-17卫星一共有2799个HIRS/3仪器的有效观测点。

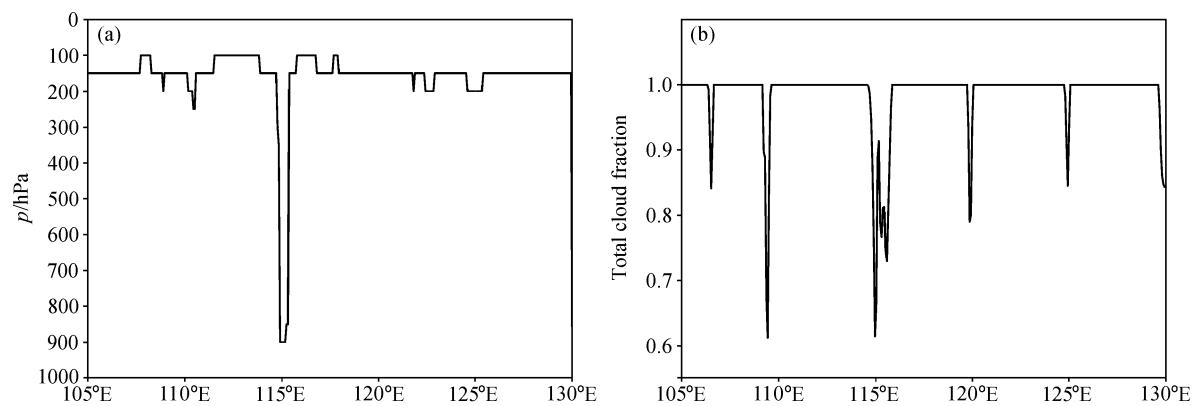


图3 2006年5月14日19时云顶气压(a, 单位: hPa)和总云量(b)沿14°N垂直剖面图
Fig. 3 Vertical cross sections of (a) cloud top pressure (hPa) and (b) total cloud fraction along 14°N at 1900 UTC 14 May 2006

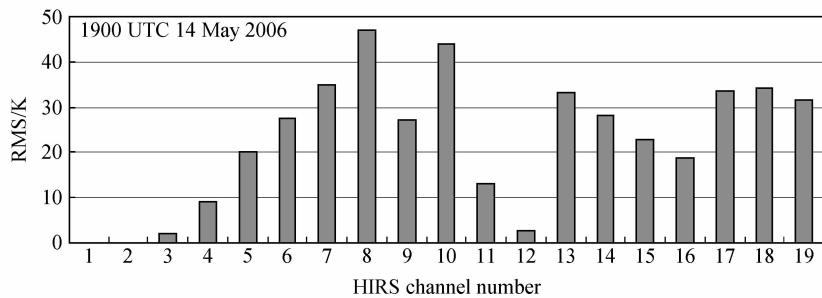


图4 两次试验模拟 NOAA-16 的亮温差异的均方根
Fig. 4 The root mean square (RMS) of difference of the simulated brightness temperatures between expt 1 and expt 2

表 2 试验 1、2 RTTOV 模式输入参数
Table 2 RTTOV model input parameters in expts 1 and 2

大气廓线参数		地表参数	云参数	卫星参数
试验 1	气温、比湿	地表类型、地表温度、地面气压、2 m 温度、2 m 比湿、2 m 风	无	卫星天顶角、方位角
试验 2	气温、比湿	地表类型、地表温度、地面气压、2 m 温度、2 m 比湿、2 m 风	云水含量、云冰水含量、云量、云顶气压、总云量	卫星天顶角、方位角

3.1 NOAA-16 卫星的模拟分析

2006 年 5 月 14 日 19 时 NOAA-16 卫星经过“珍珠”台风上空, 根据该时刻的卫星参数以及 WRF 模式对应时刻的模拟结果作为 RTTOV 模式的输入参数, 对 NOAA-16 卫星的 HIRS 仪器的 19 个通道进行了模拟。为了比较这两次试验的差异, 针对每个观测点计算了两次试验亮温之差的均方根:

$$T^{\text{ch}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (T_{1i}^{\text{ch}} - T_{2i}^{\text{ch}})^2}{N}}$$

(3)

其中, T_1 , T_2 分别表示 2 次试验模拟的亮温, i 表

示观测点序号, ch 表示通道, N 表示观测点总数。
图 4 给出了 19 个通道的两次试验亮温差的均方根, 从中可以看出有些通道云的影响并不明显, 而有些通道考虑云的影响之后, 亮温差的均方根可以超过 40 K。这与 HIRS/3 观测通道的特点有很大关系 (见表 1), 峰值能量在地表附近或低层大气的观测通道, 受云的影响比较大, 如第 7、8、10、13、17、18、19 通道等, 峰值能量位于高层大气的观测通道, 受云的影响很小, 如 1、2、3 通道等。相同吸收气体的波段, 峰值能量位置越低受到云的影响越大, 窗区通道, 波长越长受到云的影响越大。第 11、12 通道主要吸收气体为水汽, 由于两

次试验都考虑了比湿作为吸收气体,并且台风是一种湿度高度饱和的天气系统,因此这两个通道两次试验的差别较小。第 9 通道主要测量大气中 O₃ 总量其能量峰值位于大气高层,但是从图 3 可以看出云对该通道的模拟有一定的影响,这表明第 9 通道除了对 O₃ 总量敏感之外,对云也较为敏感。

表 3 给出了两次试验模拟的亮温与观测亮温的相关系数,如果没有考虑云的影响,模拟的亮温基本上不能反映出台风的结构,模拟的亮温与观测之间基本上没有相关关系。而考虑云的影响之后,大部分通道的模拟效果有很大程度的提高。相关系数的分布与图 4 有一定的类似,第 1、2、3、11 和 12 通道改进很小,总体模拟的效果也不如其他通道。这表明云对峰值能量高度在云层以上的通道(如 1、2、3 通道)影响很小,水汽吸收通道(如 11、12 通道)在台风这种高湿度天气系统下,云对其影响也不大。第 9 通道考虑云的影响之后,模拟效果有所提高,进一步表明云对该通道有一定的影响。

由以上分析发现,对于台风天气系统,云对峰值能量位于大气低层的通道影响较大。本文进一步对第 8 通道(波长 11.11 μm)的模拟进行了分析。图 5 给出了试验 1、2 模拟的第 8 通道亮温沿 14°N 剖面图以及观测,可以发现,试验 1 模拟的亮温偏高,无法模拟出台风的结构,而试验 2 可以较好地模拟出台风结构。从观测资料可以发现(14°N, 115°E)附近的亮温高于周围环境亮温,从平面图也可看出该位置为台风眼所在,试验 2 模拟的台风

眼区亮温也比周围高,但是与实际观测误差较大,这与 WRF 模式本身模拟的台风结构有很大关系。从两次试验模拟的剖面图可以看出,加入云参数后模拟效果有明显改进。

从试验 1 模拟的第 8 通道的亮温平面图(图略)上可以看出,没有考虑云的影响,辐射传输模式不能模拟出台风的螺旋结构,平均误差及均方根误差随着云量的增加有增加的趋势(表 4),由平均误差进一步看出试验 1 模拟的亮温普遍偏高。试验 2 模拟的第 8 通道的亮温可以较好地反映出台风的螺旋结构,台风眼的结构非常清晰,其中心亮温明显高于周围环境的亮温(图 6a),观测也表明台风

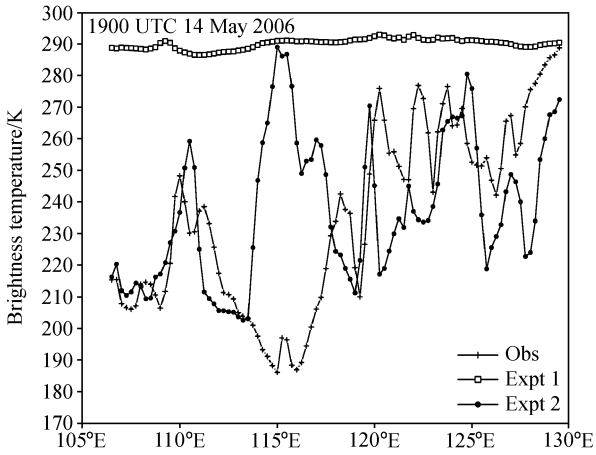


图 5 模拟和观测的 NOAA-16 HIRS/3 第 8 通道亮温沿 14°N 剖面图
Fig. 5 Vertical cross sections of simulated and observed NOAA-16 HIRS/3 channel 8 brightness temperature along 14°N

表 3 两次试验模拟 NOAA-16 的亮温与观测亮温的相关系数

Table 3 Correlations between simulated brightness temperature and NOAA-16 observations in expts 1 and 2

通道	试验 1	试验 2	通道	试验 1	试验 2
1	0.02	0.04	11	0.02	0.31
2	0.03	0.17	12	0.02	0.15
3	-0.02	0.25	13	0.02	0.42
4	0.02	0.5	14	0.02	0.42
5	0.02	0.5	15	0.02	0.41
6	0.02	0.5	16	0.02	0.41
7	0.02	0.5	17	0.02	0.36
8	0.02	0.5	18	0.02	0.36
9	0.02	0.42	19	0.02	0.38
10	0.02	0.51			

表 4 NOAA-16 第 8 通道亮温平均误差和均方根误差
Table 4 Average errors and RMSEs of simulated NOAA-16 channel 8 brightness temperatures

云量	样本数	平均误差/K		均方根误差/K	
		试验 1	试验 2	试验 1	试验 2
0~1	139	12.7	12.7	20.4	20.4
1~2	19	23.3	22.3	31.5	31.0
2~3	25	18.6	17.4	28.6	27.9
3~4	20	20.3	18.6	32.8	32.1
4~5	44	14.9	11.8	22.4	20.7
5~6	56	22.9	17.6	32.4	29.4
6~7	62	32.6	26.6	40.7	36.9
7~8	61	29.8	22.4	40.1	35.5
8~9	115	25.9	15.7	36.0	30.5
9~10	2315	46.0	-0.4	52.5	26.8

中心温度比周围略高(图 6b)。平均误差和均方根误差都没有明显随着云量的增加而增加,在样本数超过八成的总云量 9~10 的区域内,平均误差接近零。

在考虑云的影响之后,峰值能量位于云层以下的观测通道的模拟都有不同程度的改进(图略),其中第 4~10、13~19 通道的模拟误差有明显减小,与观测资料的相关系数明显增大,从不同通道模拟的误差分布(图略)可以看出长波通道模拟效果好于短波通道,这与表 3 中相关系数分布特征类似。对比模拟亮温与观测亮温的平面图(例如第 8 通道,图 5)容易看出,WRF 模式模拟的台风结构较为松散,部分云带的位置和强度与卫星观测存在差异,这与 WRF 模式模拟的大气环境变量以及云的结构都有很大关系(图略),同时也是导致模拟亮温的均方根误差较大的原因之一。

3.2 NOAA-17 卫星的模拟分析

2006 年 5 月 15 日 02 时 NOAA-17 卫星观测到“珍珠”台风,由于其 HIRS/3 的 15、16 通道缺测,因此只能对其他 17 个通道进行分析。通过计算没有云参数(试验 1)和有云参数(试验 2)两次试验模拟的亮温差的均方根(图略),可以发现云对 NOAA-17 的 HIRS/3 亮温模拟的影响与 NOAA-16 类似:峰值能量在地表附近或低层大气的观测通道,受云的影响比较大;峰值能量位于高层大气的观测通道,受云的影响很小;相同吸收气体的波段,峰值能量位置越低受到云的影响越大,窗区通道,波长越长受到云的影响越大。

分别计算两次试验模拟的亮温与观测亮温的相关系数(表 5),可以看出如果没有考虑云的影响,模拟的亮温与观测之间基本上没有相关关系,模拟的亮温不能反映出台风的结构。而考虑云的影响之后,大部分通道的模拟效果有很大程度的提高。不难发现其改进效果与表 3 中 NOAA-16 卫星的模拟结果类似。

表 6 给出了两次试验模拟的 NOAA-17 卫星 HIRS/3 第 8 通道的平均误差和均方根误差,与 NOAA-16 卫星的模拟效果类似,如果没有考虑云的影响,试验 1 模拟亮温的平均误差及均方根误差随着云量的增加有增加的趋势,模拟的亮温普遍偏高,不能反映出台风的螺旋结构(图略),这同样表明了辐射传输模式中如果没有加入云的影响是不可

表 5 两次试验模拟 NOAA-17 的亮温与观测亮温的相关系数
Table 5 Correlations between simulated brightness temperature and NOAA-17 observations in expts 1 and 2

通道	试验 1	试验 2	通道	试验 1	试验 2
1	0.02	0.09	10	0.02	0.54
2	0.08	0.32	11	0.03	0.411
3	-0.01	0.41	12	0.03	0.25
4	0.02	0.57	13	0.02	0.50
5	0.02	0.55	14	0.02	0.50
6	0.02	0.54	17	0.02	0.49
7	0.02	0.54	18	0.02	0.49
8	0.02	0.53	19	0.02	0.47
9	0.02	0.49			

表 6 NOAA-17 卫星 HIRS/3 第 8 通道亮温平均误差和均方根误差
Table 6 Average errors and RMSEs of simulated NOAA-17 channel 8 brightness temperature

云量	样本数	平均误差/K		均方根误差/K	
		试验 1	试验 2	试验 1	试验 2
0~1	218	15.9	15.8	24.4	24.3
1~2	48	20.5	19.6	28.2	27.2
2~3	45	25.1	24.0	33.1	32.3
3~4	54	24.7	21.9	32.0	29.6
4~5	44	23.7	20.5	32.6	30.1
5~6	63	24.2	18.5	31.6	28.9
6~7	70	30.7	23.9	39.3	34.9
7~8	104	25.9	17.0	34.9	29.4
8~9	112	24.0	11.5	32.3	27.6
9~10	2011	42.9	-4.0	50.5	26.9

能模拟出台风这种极端天气过程的。而加入云参数的影响之后,试验 2 模拟误差相对于试验 1 有明显改进,并且其均方根误差的整体水平没有随着云量的增加而显著增加。试验 2 可以模拟出台风螺旋结构(图 7a),其模拟的台风眼比实况范围大,台风中心附近的亮温模拟偏高,而台风外围部分云带模拟的亮温偏低,这与 WRF 模式模拟的台风结构有密切关系。

从整体来看,NOAA-17 的 HIRS/3 模拟与 NOAA-16 的结果非常类似,RTTOV 模式加入云参数以后,峰值能量位于云层以下的观测通道的模拟都有不同程度的改进,可以在一定程度上模拟出台风的螺旋结构,这进一步证实了加入三维云特征的模拟量,RTTOV 模式可以明显改进 NOAA 系

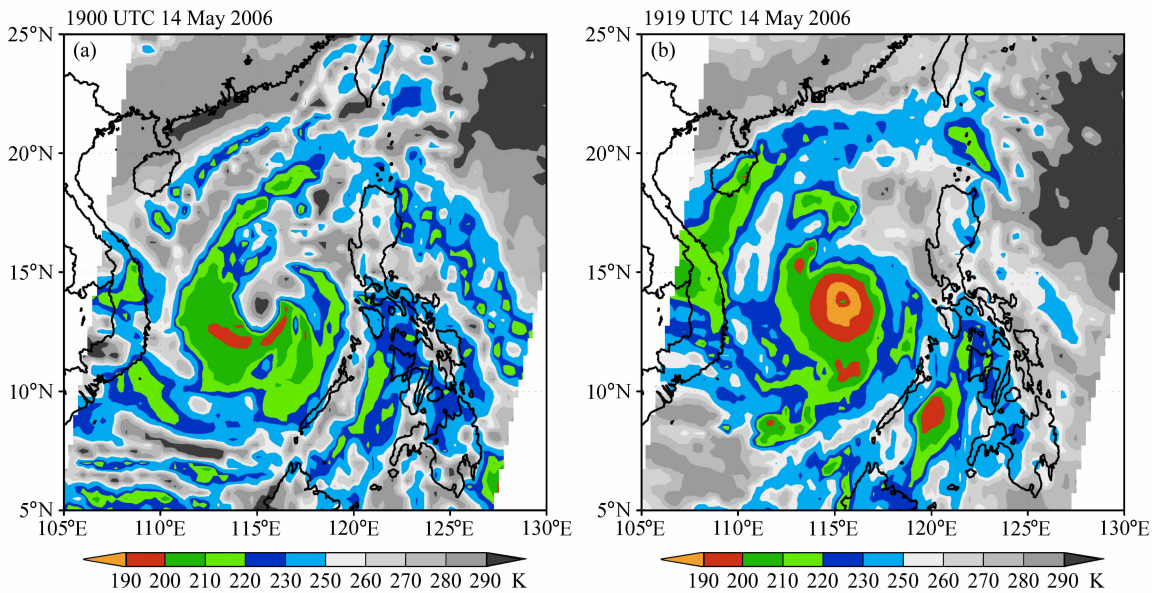


图6 NOAA-16 HIRS/3 第8通道亮温：(a) 模拟；(b) 观测
Fig. 6 (a) Simulated and (b) observed NOAA-16 HIRS/3 channel 8 brightness temperature

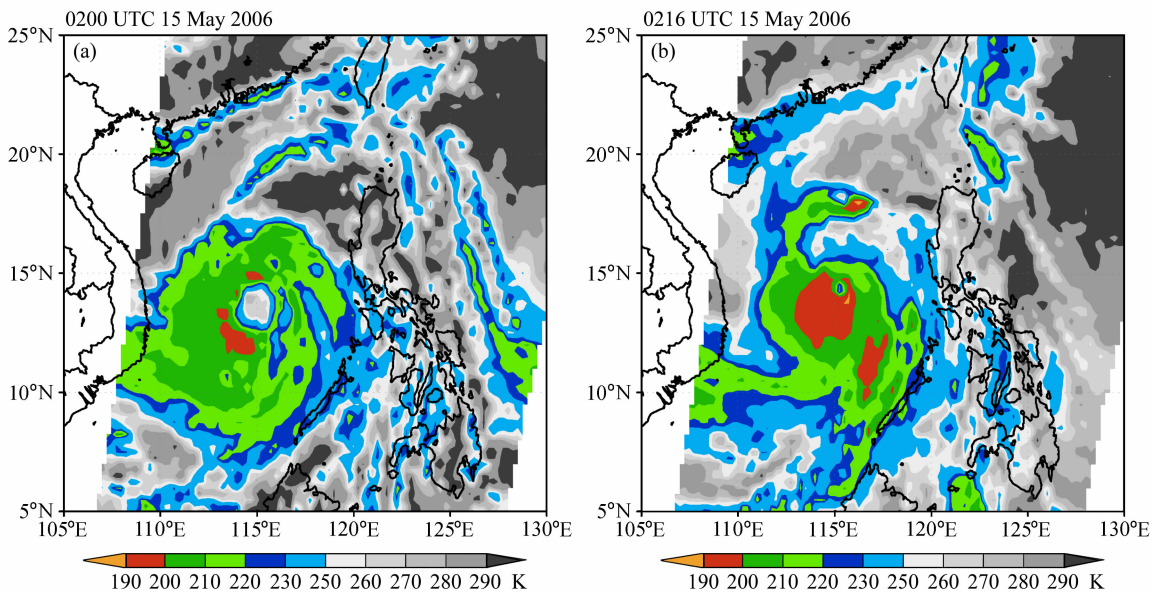


图7 NOAA-17 HIRS/3 第8通道亮温：(a) 模拟；(b) 观测
Fig. 7 (a) Simulated and (b) observed NOAA-17 HIRS/3 channel 8 brightness temperature

列卫星 HIRS/3 仪器对台风观测的模拟。

4 结论

通过有云和无云条件下的模拟试验，表明在台风这种极端天气条件下，如果没有考虑云的影响，RTTOV 模式无法正确模拟“珍珠”台风的结构，模拟的温度比观测普遍明显偏高。加入气象模式模拟的云的结构，RTTOV 模式可以较好地模拟出部

分 HIRS/3 红外通道（如第 4~10、13~19 通道）台风螺旋结构，云对峰值能量位于云层以下的通道的模拟有十分重要的影响，峰值能量的位置越低，其影响程度越大。

采用本文方案模拟的亮温能够反映出台风的结构特征，并且与实际观测存在显著的相关关系。这表明本文的方案可以作为检验模式模拟效果的一种手段，同时也说明部分红外通道的辐射亮温资料在

热带天气系统的资料同化过程中具有潜在的应用能力。

参考文献 (References)

- [1] 吕达仁, 王普才, 邱金桓, 等. 大气遥感与卫星气象学研究的进展与回顾. 大气科学, 2003, **27** (4): 552~566
Lü Daren, Wang Pucai, Qiu Jinhuang, et al. An overview on the research progress of atmospheric remote sensing and satellite meteorology in China. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2003, **27** (4): 552~566
- [2] 丁伟钰, 万齐林, 端义宏. TRMM降水率资料的三维变分同化及其对“杜鹃”(0313)台风预报的改进. 大气科学, 2005, **29** (4): 600~608
Ding Wei-Yu, Wan Qi-Lin, Duan Yi-Hong. 3D-var assimilation of TRMM rain rate and its impact on the typhoon Dujuan (0313) forecast. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2005, **29** (4): 600~608
- [3] 丁伟钰, 陈子通. 利用 TRMM 资料分析 2002 年登陆广东的热带气旋降水分布特征. 应用气象学报, 2004, **15** (4): 436~444
Ding Weiyu, Chen Zitong. Using TRMM data to analyse the precipitation distributions of tropic cyclones' landfall in Guangdong. *Journal of Applied Meteorological Science* (in Chinese), 2004, **15** (4): 436~444
- [4] 鲍李峰, 陆洋, 王勇, 等. 利用多年卫星测高资料研究南海上层环流季节特征. 地球物理学报, 2005, **48** (3): 543~550
Bao Li-Feng, Lu Yang, Wang Yong, et al. Seasonal variations of upper ocean circulation over the South China Sea from satellite altimetry data of many years. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 2005, **48** (3): 543~550
- [5] 师春香, 谢正辉. 卫星多通道红外信息反演大气可降水业务方法. 红外与毫米波学报, 2005, **24** (4): 304~308
Shi Chun-Xiang, Xie Zheng-Hui. Operational method of total precipitable water retrieved from satellite multi-channels' infrared data. *Journal of Infrared and Millimeter Waves* (in Chinese), 2005, **24** (4): 304~308
- [6] 王宗皓. 卫星探测辐射率在数值天气预报中的直接应用. 应用气象学报, 1995, **6** (1): 101~108
Wang Zonghao. Direct use of satellite sounding radiances in numerical weather prediction. *Journal of Applied Meteorological Science* (in Chinese), 1995, **6** (1): 101~108
- [7] Derber J C, Wu W. The use of TOVS cloud-cleared radiances in the NCEP SSI analysis system. *Mon. Wea. Rev.*, 1998, **126**: 2287~2299
- [8] 张华, 丑纪范, 邱崇践. 西北太平洋威马逊台风结构的卫星观测同化分析. 科学通报, 2004, **49** (5): 493~498
Zhang Hua, Chou Jifan, Qiu Chongjian. Assimilation analysis of Rammasun typhoon structure over Northwest Pacific using satellite. *Chinese Science Bulletin* (in Chinese), 2004, **49** (5): 493~498
- [9] Okamoto K, Derber J C. Assimilation of SSM/I radiances in the NCEP global data assimilation system. *Mon. Wea. Rev.*, 2006, **134**: 2612~2631
- [10] Rossow W B. Cloud detection using satellite measurements of infrared and visible radiances for ISCCP. *J. Climate*, 1993, **6**: 2341~2369
- [11] 官莉, 肖稳安, Huang Hung-Lung. 红外高光谱观测值反演云参数. 大气科学, 2007, **31** (6): 1123~1128
Guan Li, Xiao Wen-An, Huang Hung-Lung. Retrieval of cloud parameters using infrared hyperspectral observations. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2007, **31** (6): 1123~1128
- [12] Vukicevic T, Greenwald T, Zupanski M, et al. Mesoscale cloud state estimation from visible and infrared satellite radiances. *Mon. Wea. Rev.*, 2004, **132** (12): 3066~3077
- [13] 李响英, 字如聪. AREM 模拟云参数与卫星观测的比较研究. 大气科学, 2006, **30** (6): 1198~1206
Li Yun-Ying, Yu Ru-Cong. Comparison of cloud parameters between AREM simulation and satellite retrieval. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2006, **30** (6): 1198~1206
- [14] Greenwald T J, Hertenstein R, Vukicevic T. An all-weather observational operator for radiance data assimilation with mesoscale forecast models. *Mon. Wea. Rev.*, 2002, **130**: 1882~1897
- [15] Chevallier F, Kelly G. Model clouds as seen from space: Comparison with geostationary imagery in the 11- μ m window channel. *Mon. Wea. Rev.*, 2002, **130**: 712~722
- [16] Ma Gang, Fang Zongyi, Zhang Fengying. An error analysis on the simulated data of TOVS HIRS by RTTOV5 model. *Acta Meteorologica Sinica*, 2002, **16** (2): 226~241
- [17] Saunders R W, Matricardi M, Brunel P. An improved fast radiative transfer model for assimilation of satellite radiance observations. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 1999, **125**: 1407~1425
- [18] Liebe H J. MPM-an atmospheric millimeter-wave propagation model. *International Journal Infrared and Millimeter Waves*, 1989, **10** (6): 631~650
- [19] Smith E A, Lei Shi. Surface forcing of the infrared cooling profile over the Tibetan Plateau. Part I: Influence of relative longwave radiative heating at high altitude. *J. Atmos. Sci.*, **49**: 805~822
- [20] Raisanen P. Effective longwave cloud fraction and maximum-random overlap of clouds: A problem and a solution. *Mon. Wea. Rev.*, 1998, **126**: 3336~3340