

RTTOV 和 CRTM 对“罗莎”台风卫星微波观测的模拟研究与比较^{*1}

刘硕松¹ 董佩明^{2,3} 韩 威³ 张文军²

LIU Shuosong¹ DONG Peiming^{2,3} HAN Wei³ ZHANG Wenjun²

1. 空军气象中心, 北京, 100042

2. 北京航空气象研究所, 北京, 100085

3. 中国气象局数值预报中心, 北京, 100081

1. *Air Force Meteorological Center, Beijing 100042, China*

2. *Beijing Aviation Meteorological Institute, Beijing 100085, China*

3. *Numerical Prediction Center, Chinese Meteorology Administration, Beijing 100081, China*

2010-06-22 收稿, 2011-05-11 改回.

Liu Shuosong, Dong Peiming, Han Wei, Zhang Wenjun, 2012. Simulative study of satellite microwave observations for Typhoon Luosha using RTTOV and CRTM and the comparison. *Acta Meteorologica Sinica*, 70(3):585-597

Abstract The inclusion of the radiative effect of hydrometeor in the rapid radiative transfer model has important effect on the simulation of satellite observations. In this paper, with the hydrometeor amounts from the WRF forecast as an input, both the rapid radiative transfer models RTTOV and CRTM, together with their Jacobian models, are utilized to investigate the radiative effect of the hydrometeors on the simulation of the AMSUA/B microwave satellite observations. The results are also compared between the different models. It is shown that the characteristics of the response function and the influence on the simulation of satellite brightness temperature of hydrometeor are almost the same for RTTOV and CRTM. The response function of hydrometeor obtained from Jacobin models corresponds well with the distribution of hydrometeor. The response function of cloud and rain water concentrates on the low and middle levels and that of ice and snow locates on the middle and high levels. The magnitude from CRTM is larger than that from RTTOV. For AMSUA, the radiative effect of cloud and rain water increases the simulated brightness temperature, especially on those window channels with low frequency. The ice and snow show an effect of lowering temperature as compared with the satellite observation. For AMSUB, hydrometeor mainly decreases the simulated brightness temperature, especially on the channel 2. The result of CRTM is also larger than that of RTTOV. At present, only cloud, rain, ice and snow are taken into account by RTTOV. The consideration of radiative effect of hydrometeor by CRTM is more perfect than that of RTTOV since graupel and hail are included as well with it.

Key words Rapid radiative transfer model, RTTOV, CRTM, Satellite microwave observation, Cloud and precipitation conditions

摘 要 快速辐射传输模式中水成物辐射效应的考虑对卫星观测模拟具有重要的影响。利用区域中尺度数值模式 WRF 预报输出水成物含量和温湿廓线等参数,使用欧洲中期数值天气预报中心和美国卫星资料同化联合中心发展建立的快速辐射传输模式 RTTOV 和 CRTM,结合雅可比模式计算得到的响应函数,分析了各种水成物辐射效应对 AMSUA/B 卫星微波观测各通道亮温模拟的影响,并比较了 RTTOV 和 CRTM 结果间的异同。结果表明,RTTOV 和 CRTM 两个快速辐射传输模式

* 资助课题:国家自然科学基金项目(41075017,40775027)。

作者简介:刘硕松,主要从事资料同化应用的研究。E-mail: lissal2005@yahoo.com.cn

计算得到的水成物响应函数和水成物辐射效应对模拟亮温影响特征基本一致,但量级上存在差异。雅可比表征的水成物响应函数和水成物本身的分布层次对应关系良好,云水和雨水的响应函数主要分布在中下层,冰水和雪则分布在中上层。相对于 RTTOV, CRTM 计算得到的水成物响应函数要大一些。对 AMSUA, 云水和雨水的辐射效应对通道模拟亮温主要以增温为主,尤其是在低频的窗区通道,冰晶和雪则体现散射效应为主的降温作用。对 AMSUB, 水成物辐射效应的考虑使得模拟亮温降低,尤其是通道 2 降温幅度最大。CRTM 计算出的水成物辐射效应带来的模拟亮温变化幅度大于 RTTOV。目前, CRTM 除了考虑云、雨、冰和雪 4 种水成物外,还考虑霰和雹的辐射效应,对水成物辐射效应的考虑比 RTTOV 更完善一些。

关键词 快速辐射传输模式, RTTOV, CRTM, 卫星微波观测, 云雨条件

中图法分类号 P405

1 引言

随着卫星和计算机技术的发展,大量的卫星资料在气象领域,特别是数值天气预报中得到了越来越广泛的应用。欧洲中期数值预报中心 ECMWF 公布的数据显示,卫星资料占到了所有同化资料的 90% 以上,而纯粹的卫星辐射率资料又占到所有使用资料的 80% 以上。同时,卫星资料的使用也极大地改善了数值预报的效果。但是,尽管卫星资料的应用已取得了巨大成就,由于同化系统中观测算子云雨粒子辐射效应、湿物理过程等问题的复杂性,目前同化系统中真正使用了的卫星资料大约仅占现有卫星资料的 5%, 卫星资料应用还需要进一步深入研究,同时也具有很大的潜力(董佩明等, 2008; 薛纪善, 2009)。

快速辐射传输模式是卫星辐射率资料直接同化所需要的观测算子。给定大气温度、湿度廓线以及表面状态等模式初始变量,快速辐射传输模式沿着卫星扫描仪的观测方向(扫描角),根据仪器探测通道的平均光谱响应函数,以较高精度计算卫星的模拟探测值。晴空条件下快速辐射传输模式对卫星观测的模拟已经能够达到相当高的精度,而由于水成物辐射效应的复杂性,云雨条件下的计算精度还有待进一步提高,这也正是目前数值预报中卫星资料的同化应用还主要是针对晴空条件进行的原因所在。为推动云雨条件下卫星资料的应用,当前应用最广和最具代表性的两个快速辐射传输模式即欧洲和美国分别开发建立的 RTTOV 和 CRTM,都在发展完善水成物辐射效应的相应模块(Bauer, et al, 2006; Weng, et al, 2003, 2005)。Chevallier 等(2003)使用 RTTOV 模拟了云雨条件下的卫星观测并与 SSM/I 观测做比较。马刚等(2001, 2005)分

析了 RTTOV5 模拟 NOAA-14 卫星红外通道亮温的误差及其对云参数(云量、云高)的敏感性,之后又采用 RTTOV7 对风云 2 号红外和水汽成像通道辐射率的模拟进行了研究。丁伟钰等(2008)使用 RTTOV8.7 对“珍珠”台风的红外辐射探测仪 HIRS/3 红外辐射亮温进行了模拟,比较了有云和无云条件下的模拟结果。董佩明等(2009)分析了快速辐射传输模式 CRTM 中水成物对卫星微波观测各通道模拟亮温的影响。

本文以台风“罗莎”为研究个例,利用区域中尺度数值模式 WRF 预报输出快速辐射传输模式所需水成物和温湿度参数,使用快速辐射传输模式 RTTOV 和 CRTM,结合雅可比计算得到水成物响应函数,进一步讨论了考虑水成物辐射效应下卫星微波观测的模拟计算情况,并同时就两个快速辐射传输模式的结果进行比较。

2 模式及资料介绍

2.1 RTTOV

RTTOV 是欧洲中期数值天气预报中心 ECMWF 在 Eyre(1991)开发的用于模拟 TOVS 卫星观测的辐射传输模式基础上发展起来的,目前已在卫星资料同化业务应用中得到较为广泛使用的一个快速辐射传输模式。该模式有着较长的发展历史,最新版本为 2011 年初发布的 RTTOV10,文中使用的是其前一版 RTTOV9.3。

RTTOV 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,但是,有云条件下卫星观测模拟的计算对红外和微波观测采取了不同的处理方式,对于红外散射效应使用参数化方式,对微波卫星观测则直接显式处理多种粒子的辐射效应,当前包括云、雨、冰和雪 4 类,所以,

RTTOV 中红外和微波观测有云条件下的计算是在两个不同模块中实现的,不过在 RTTOV8 中两者又是可以通过同一模块计算。更详细的内容见用户手册(Roger, et al, 2008)。

2.2 CRTM

CRTM 是美国卫星资料同化联合中心 JCSDA 近年来开发建立的快速辐射传输模式,设计目标是能够利用该模式最终实现数值天气预报中全天候条件下卫星资料的同化应用,所以,对云雨条件下卫星观测的模拟计算能力是模式设计的一个突出特点。CRTM 具有较好的程序框架结构设计和较先进的辐射传输物理模型,最新版本为 CRTM2 并仍在持续发展中。

CRTM 模式对云和降水粒子散射效应的考虑均基于米(Mie)散射理论,包括云水、云冰、雨、雪、霰及雹 6 类粒子。云和降水的光学参数通过米散射理论用分布函数计算,诸如消光系数、单散射率等参数事先计算做成查询表,依据粒子的平均大小和含水量查询。不同粒子类型通过水或冰的不同介电常数来处理。更详细的内容见用户手册(Han, et al, 2006)。

目前,RTTOV93 和 CRTM1.2 这两个快速辐射传输模式都已通过较为统一的接口接入了中国气象局开发建立的 GRAPES 数值预报系统的资料同化系统中,两者可以选择使用,成为开展卫星资料同化工作的一个基础。

2.3 卫星资料

卫星资料使用美国极轨卫星 NOAA-16 先进的微波探测器 A/B 型(AMSUA/B)资料。AMSUA 主要用于探测大气温度,有 15 个通道,最大扫描角 48.33° ,星下点分辨率 48.05 km 。AMSUB 主要探测湿度,有 5 个通道,最大扫描角 48.95° ,星下点分辨率约 16.0 km 。

2.4 研究个例

0716 号台风“罗莎”是 1949 年以来第 5 个在 10 月登陆浙闽沿海的台风,也是 2007 年第 8 个登陆中国的台风。“罗莎”于 10 月 2 日在菲律宾以东海面上形成,10 月 6 日在中国台湾省宜兰县沿海登陆,登陆后在台湾东部沿海打转,当日在台湾宜兰县沿海再次登陆。之后,“罗莎”穿过台湾东北部进入台

湾海峡并减弱,于 7 日在浙江省苍南县至福建省福鼎市一带沿海第 3 次登陆。

2.5 WRF 模式

区域中尺度模式 WRF 用来为快速辐射传输模式提供水成物和大气温湿等参数。WRF 是美国国家大气研究中心(NCAR)开发研制的新一代预报模式,在中外都已得到较多使用,详细的内容可以参看用户手册(Wang, et al, 2010)及相关文献。

WRF 模式初始及边界资料选用 NCEP 再分析场,积分初始时刻取 2007 年 10 月 2 日 18 时(世界时,下同),预报时效 24 h,水平区域中心点为 19°N , 130°E ,两重嵌套网格,粗网格格距为 54 km ,格点数 121×101 ,细网格格距为 18 km ,格点数 204×192 。云物理过程显式方案选用 Lin 方案,该方案考虑了 6 类水相态,包含水汽、云水、雨水、云冰、雪和霰,是 WRF 模式中相对成熟的微物理方案,比较适合研究应用。模式其他物理过程包括边界层过程 YSU 方案、积云对流 Betts-Miller-Janjic 方案、长波辐射 RRTM 方案、短波辐射 Dudhia 方案和近地面层热力混合方案。

3 水成物和云参数特征分析

对 WRF 模式模拟得到的各种水成物进行整层积分则得到单位面积整层气柱含量分布(图 1)。可以看出,在 20°N , 128.5°E 附近有一明显台风眼区。云水、雨水和霰分布相对集中在台风眼区附近,冰水和雪水分布较广泛,且有很明显的台风外围螺旋云带。

从台风中心区域($18^\circ\text{—}24^\circ\text{N}$, $125^\circ\text{—}131^\circ\text{E}$)水成物含量垂直廓线(图 2)的分析可以看到,云水和雨水主要分布在 0°C 以下区域,少部分云水超过 0°C ,最高到达 300 hPa 附近。冰水和雪水分布在 0°C 以上的 500 到 100 hPa 高度,雪水分布层次略低于冰水。霰的分布层次集中在 $600\text{—}300\text{ hPa}$ 。

RTTOV 的水成物参数需要云覆盖量,文中采用相对湿度诊断得到。云量 N 与相对湿度的经验公式取为

$$N = \left(\frac{f - f_0}{1.0 - f_0} \right)^b \quad (1)$$

式中, N 的范围为 $0\text{—}1.0$, f 为相对湿度, f_0 为随高

度变化的相对湿度临界值,在 600 m 以下取为0.9; 600—1500 m 取为 0.5;1500—2500 m 取为 0.6; 2500 m 以上取为 0.5。 b 是一个经验常数,一般取为 2。

从诊断云量沿 20°N 的垂直剖面(图 3)可见,云的主体位于 250—950 hPa。在 128.5°E 附近除了有少量低云外,存在有一狭长的无云区域,对应台风眼区,围绕眼区附近有深厚的云层,水平方向上云量

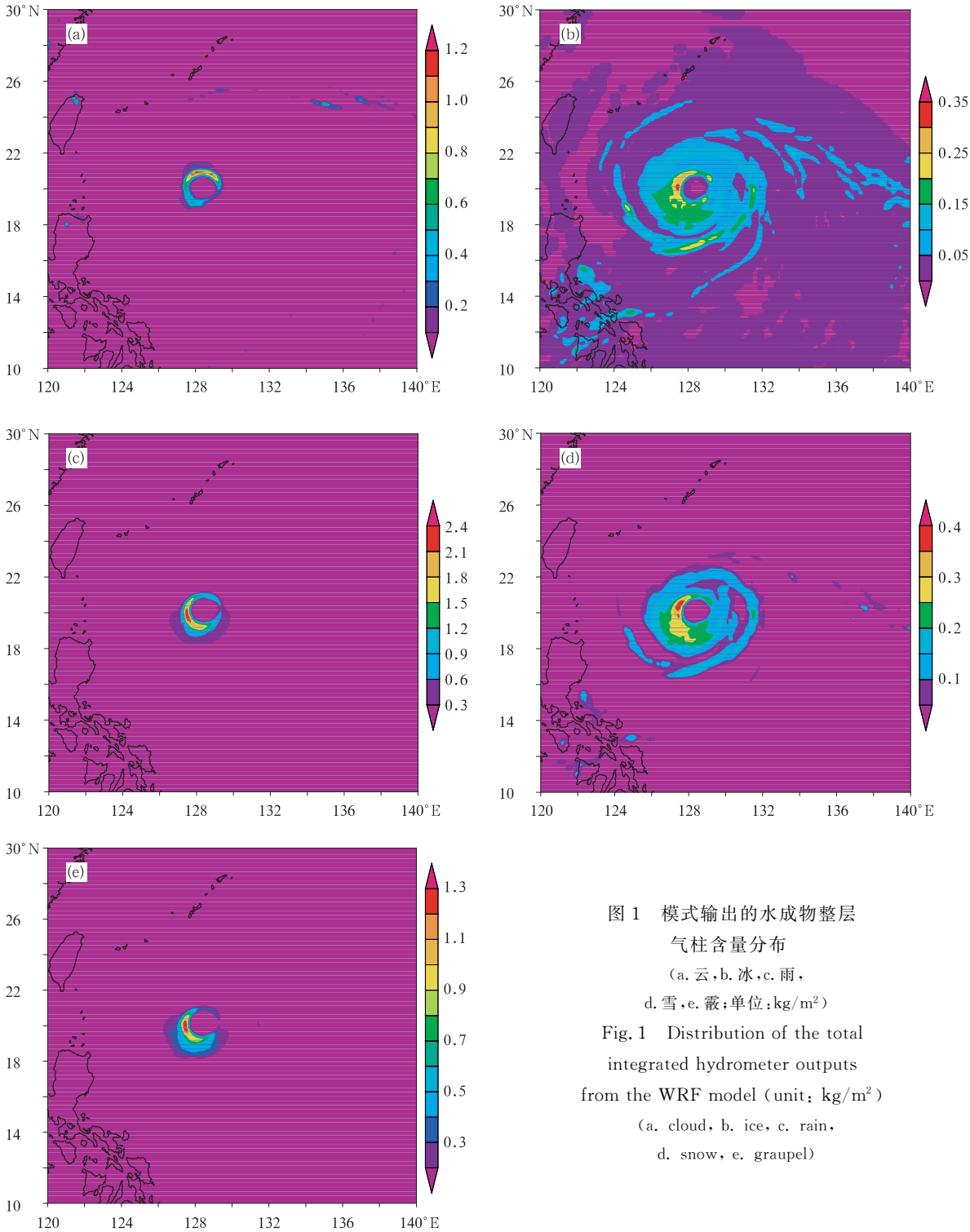


图 1 模式输出的水成物整层
气柱含量分布
(a. 云, b. 冰, c. 雨,
d. 雪, e. 霰;单位: kg/m²)
Fig. 1 Distribution of the total
integrated hydrometer outputs
from the WRF model (unit: kg/m²)
(a. cloud, b. ice, c. rain,
d. snow, e. graupel)

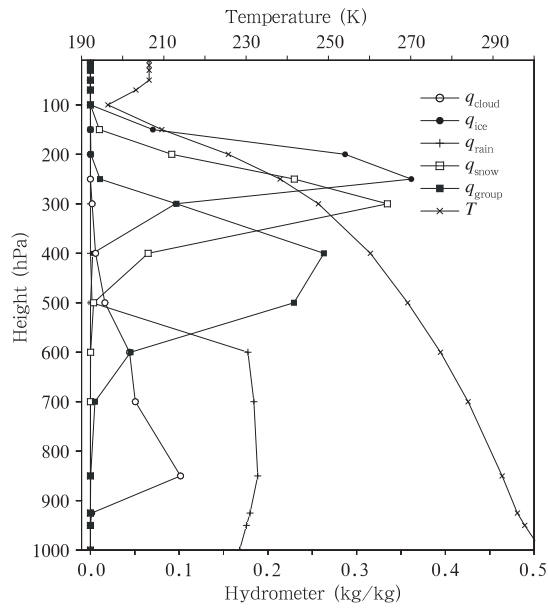


图 2 台风中心区域(18°—24°N, 125°—131°E)水成物含量垂直廓线
Fig. 2 Vertical profile of the hydrometer contents in the centre area of the typhoon (18°—24°N, 125°—131°E)

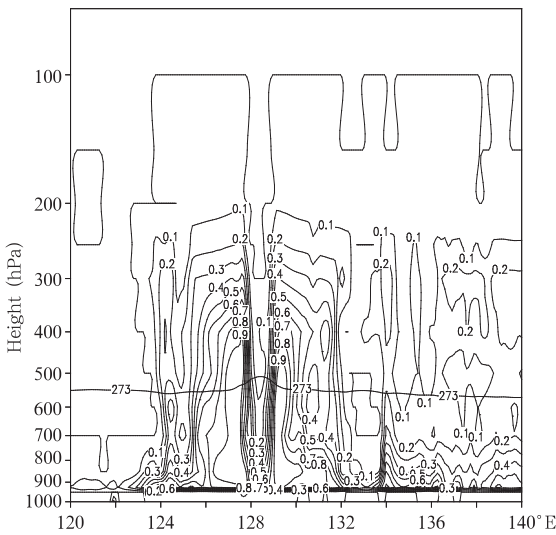


图 3 诊断云量沿 20°N 垂直剖面
(图中的水平横线代表 0℃即 273 K 所在高度)
Fig. 3 Cross section of the diagnosed cloud cover at 20°N
(the thick horizontal solid line denotes the height at which the 0℃-level is located)

呈螺旋状延展。

快速辐射传输模式 CRTM 在考虑水成物辐射效应的计算时除水成物含量外,还需要粒子有效半径和有效半径变化。由于缺少云中粒子谱的观测资料和可信的数据,通常处理的方法是不考虑云粒子的微物理结构,笼统地将粒子有效半径设定成常数。文中根据粒子半径的典型值,设定云水、冰水、雨水、雪水和霰的有效半径分别为 15、200、200、600 和 600 μm 。有效半径变化目前 CRTM 暂时处理为一常数。

4 水成物辐射效应对亮温模拟的影响

若只给定大气温度和湿度廓线,结合卫星扫描角和经纬度等参数,快速辐射传输模式计算得到的卫星亮温,即是在不考虑水成物情况(晴空条件下)的卫星观测模拟。加入各种水成物参数信息并同实际卫星观测作比较,则可以分析水成物辐射效应对卫星观测模拟的影响。限于篇幅,本文只给出 RTTOV 和 CRTM 模式模拟 AMSUA/B 通道 1 的计算结果(图 4、5)。

可以看到,不考虑水成物辐射效应模拟得到的亮温与实际卫星观测存在较大偏差,尤其是在台风中心区域误差更明显。而考虑水成物的辐射效应后,模拟结果有了较大的改善,特别是台风中心区域的中心结构有了较为清楚的体现,更加接近卫星实际观测特征。

从 RTTOV 和 CRTM 的比较来看,晴空条件下两个模式模拟结果基本一致,考虑云水、冰水、雨水和雪 4 种水成物后,对于 AMSUA,RTTOV 模式能够较好地体现台风中心区域亮温的分布情况(图 4b),也比 CRTM(图 5b)更接近卫星亮温观测(图 4a)。对于 AMSUB,在卫星实际观测中(图 4d),台风中心区域对应于一亮温低值区。从模拟结果看,加入云、雨、冰、雪 4 种水成物均使台风中心区域出现不同程度的亮温低值,但与实况量级还有较大差距(图 4e、5e)。CRTM 考虑霰的辐射效应后(图 5f),则起到了明显的降温作用,CRTM 的 5 类水成物的模拟结果与实际卫星观测特征(图 4d)更为接近。

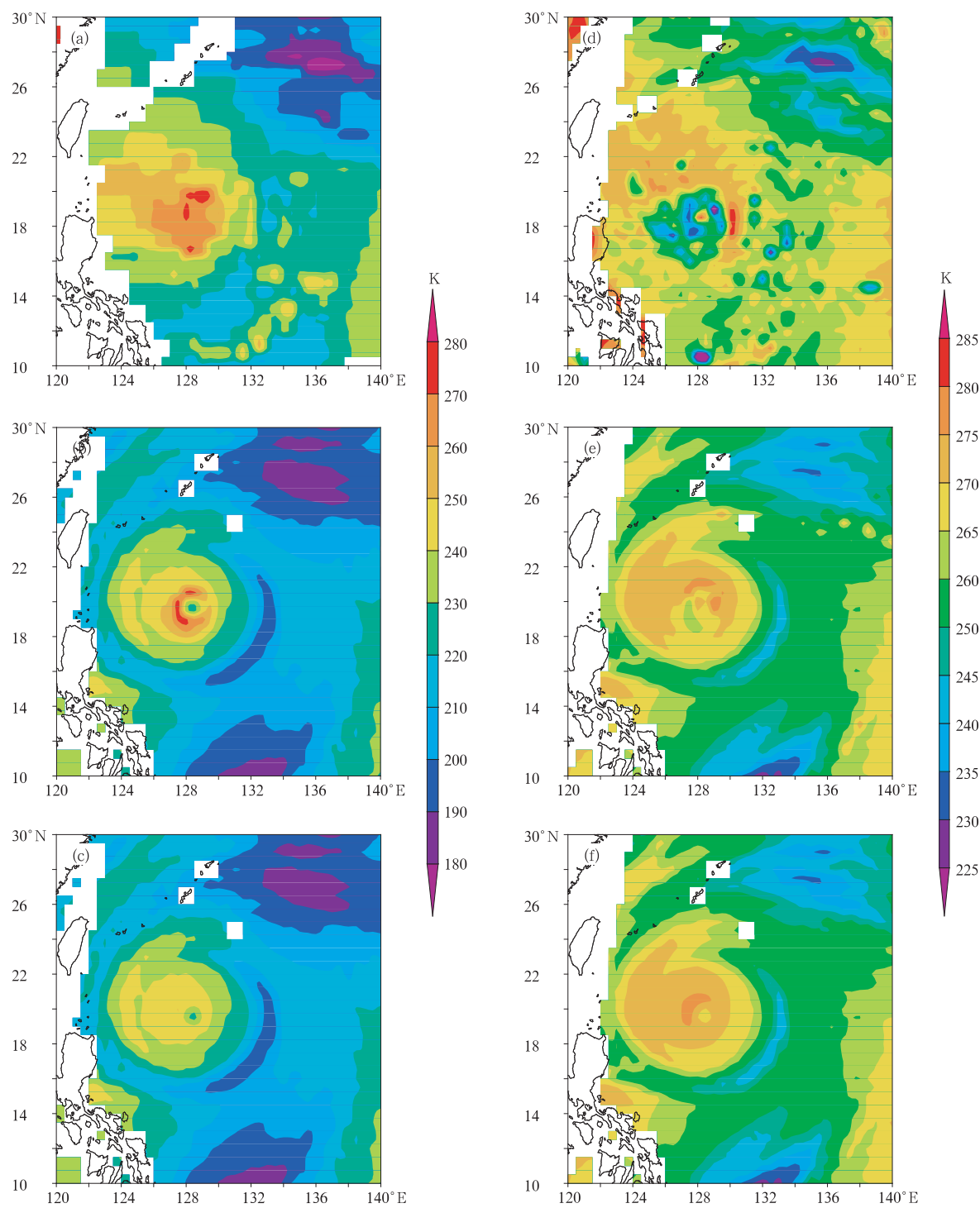


图 4 AMSUA/B 通道 1 卫星观测和 RTTOV 模拟亮温

(a. AMSUA 观测, b. AMSUA 考虑 4 种水成物, c. AMSUA 不考虑水成物,
d. AMSUB 观测, e. AMSUB 考虑 4 种水成物, f. AMSUB 不考虑水成物)

Fig. 4 Observations for AMSUA/B channel 1 and
RTTOV-simulated bright temperatures

(a. AMSUA observation, b. AMSUA simulation with 4 kinds of hydrometer,
c. AMSUA simulation without hydrometer, d. AMSUB observation,
e. AMSUB simulation with 4 kinds of hydrometer, f. AMSUB simulation without hydrometer)

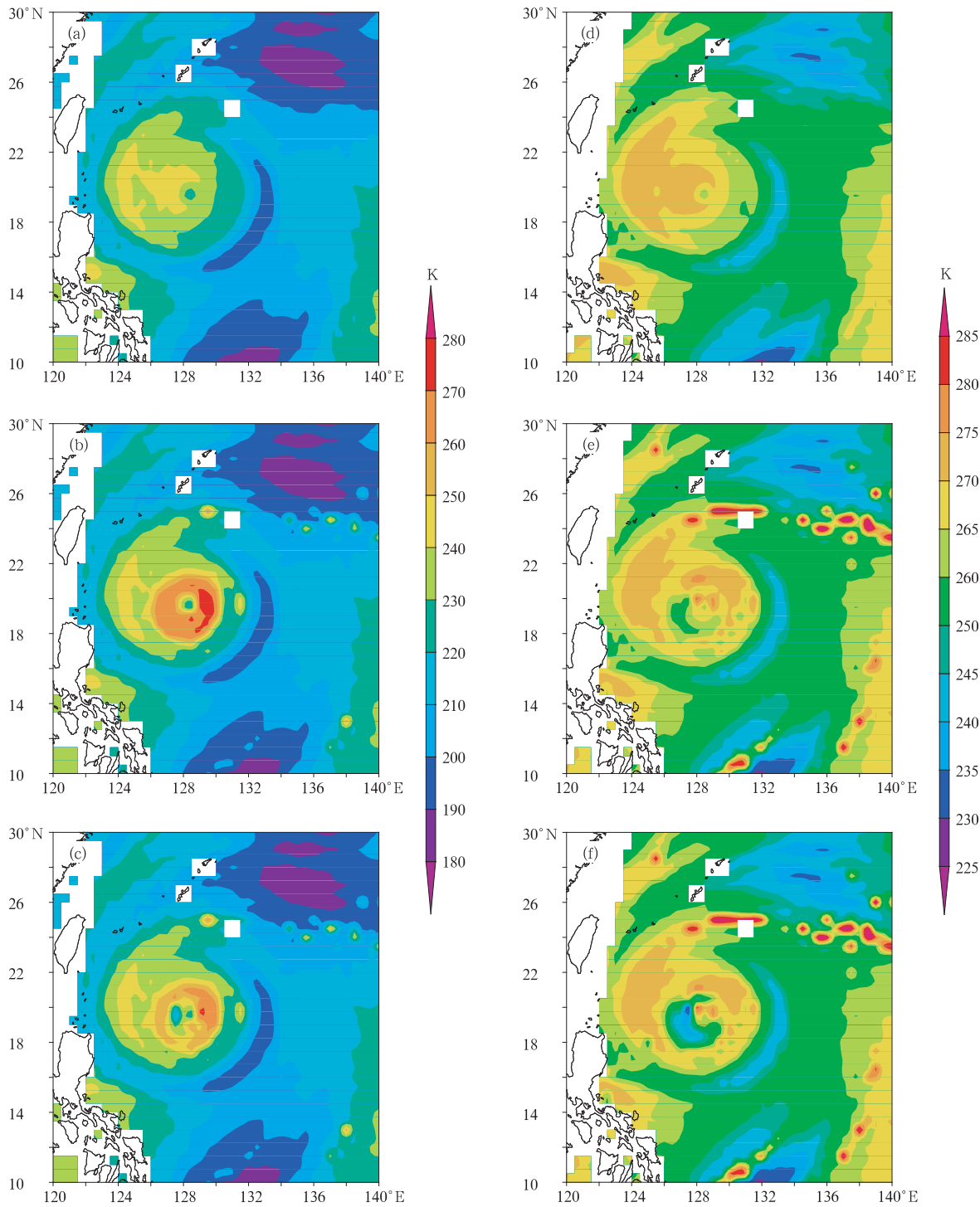


图 5 AMSUA/B 通道 1 CRTM 模拟亮温

(a. AMSUA 不考虑水成物, b. AMSUA 考虑 4 种水成物, c. AMSUA 考虑 5 种水成物,
d. AMSUB 不考虑水成物, e. AMSUB 考虑 4 种水成物, f. AMSUB 考虑 5 种水成物)

Fig. 5 CRTM-simulated bright temperatures for AMSUA/B channel 1

(a. AMSUA simulation without hydrometer; b. AMSUA simulation with 4 kinds of hydrometer;
c. AMSUA simulation with 5 kinds of hydrometer; d. AMSUB simulation without hydrometer;
e. AMSUB simulation with 4 kinds of hydrometer; f. AMSUB simulation with 5 kinds of hydrometer)

5 模拟误差分析和比较

结合水成物在卫星各探测通道的响应函数,以台风中心为分析区域,计算 AMSUA/B 各通道考虑不同水成物辐射效应相对于晴空条件下正向模式模拟亮温偏差的区域平均和区域均方根误差,进一步分析各类水成物对卫星微波观测模拟计算的影响并比较两个快速辐射传输模式结果的异同。

5.1 水成物响应函数

卫星资料同化观测算子除计算卫星辐射率模拟值的正向模式外,计算雅可比的伴随模式也是重要组成之一。对于给定单位亮温的扰动,通过伴随模式计算的模式输入参数响应函数可以定量反映出参数在各通道与不同高度层次上的敏感性。水成物在某通道某层次的敏感性越大,则水成物辐射效应对辐射传输模式模拟亮温的影响越明显。图 6 和 7 分

别给出了 RTTOV 和 CRTM 模拟的水成物对 AM-SUA/B 各通道的响应函数。

在 AMSUA、RTTOV 的结果图中,云水响应函数对应的峰值出现在 850 和 300 hPa 附近,分别对应 WRF 模式输出云水含量垂直廓线的峰值区和云层顶。冰水响应函数的绝对值较小,对通道的敏感性主要体现在大气冰水含量峰值的下层和上层。雨水在分布层顶的 500 hPa 高度敏感性最强,窗区通道上表现出了较强的吸收作用。雪在 300 hPa 上表现出了较强的散射作用,尤其 15 通道最为明显。对 AMSUB,除了云水和雨水在 1 通道外,响应函数均为负值,表现出较强的散射作用。需要指出的是,云水的响应函数最大值出现在 300 hPa,该层次上云水含量稀少,辐射效应对模式模拟亮温的影响很小,这与敏感性在该层次上最大并不矛盾。

CRTM 各种水成物响应函数的分布特征(图 7)

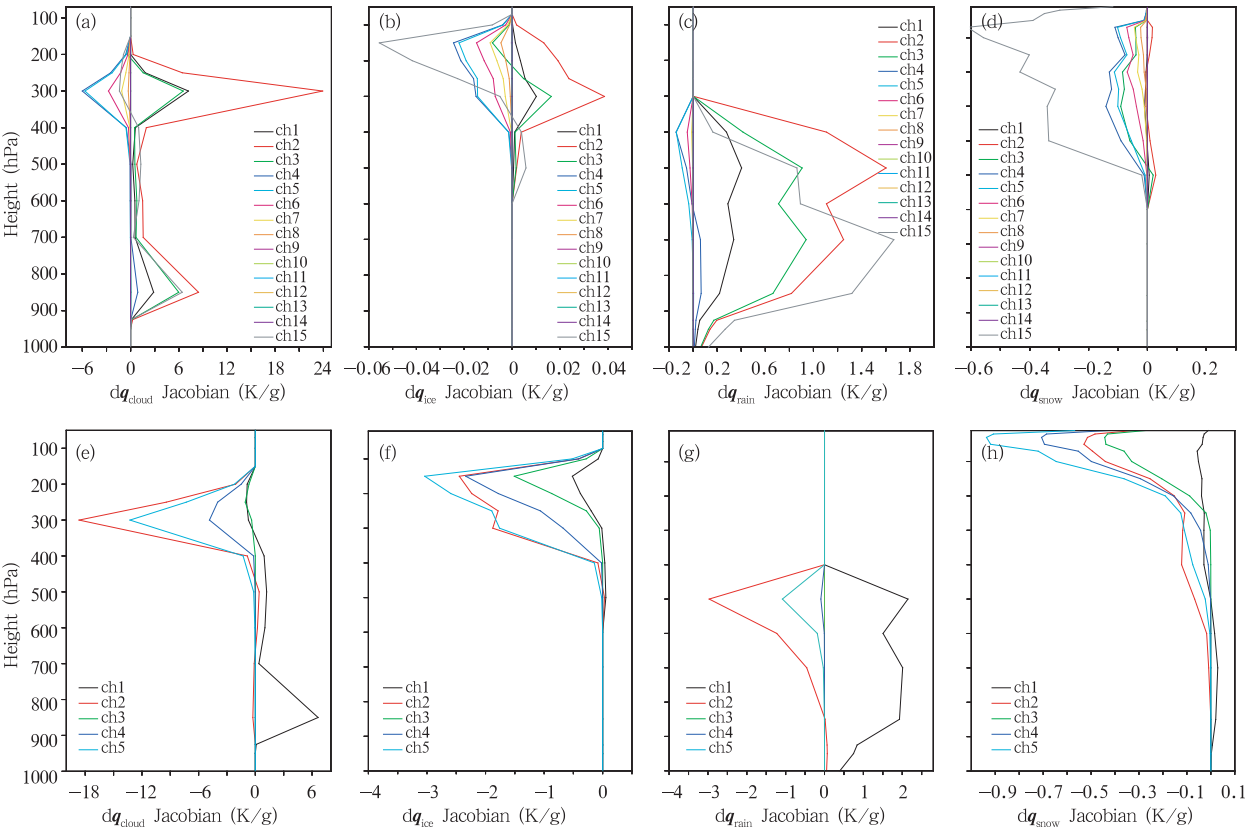


图 6 台风中心区域 RTTOV 水成物 AMSUA/B 各探测通道响应函数
(a、b、c、d. AMSUA 云水、冰水、雨水、雪; e、f、g、h. AMSUB 云水、冰水、雨水、雪)
Fig. 6 AMSUA/B response function of hydrometer in the typhoon centre area
obtained from RTTOV Jacobian model for the various channels
(a、b、c、d. AMSUA cloud,ice,rain,snow; e、f、g、h. AMSUB cloud,ice,rain,snow)

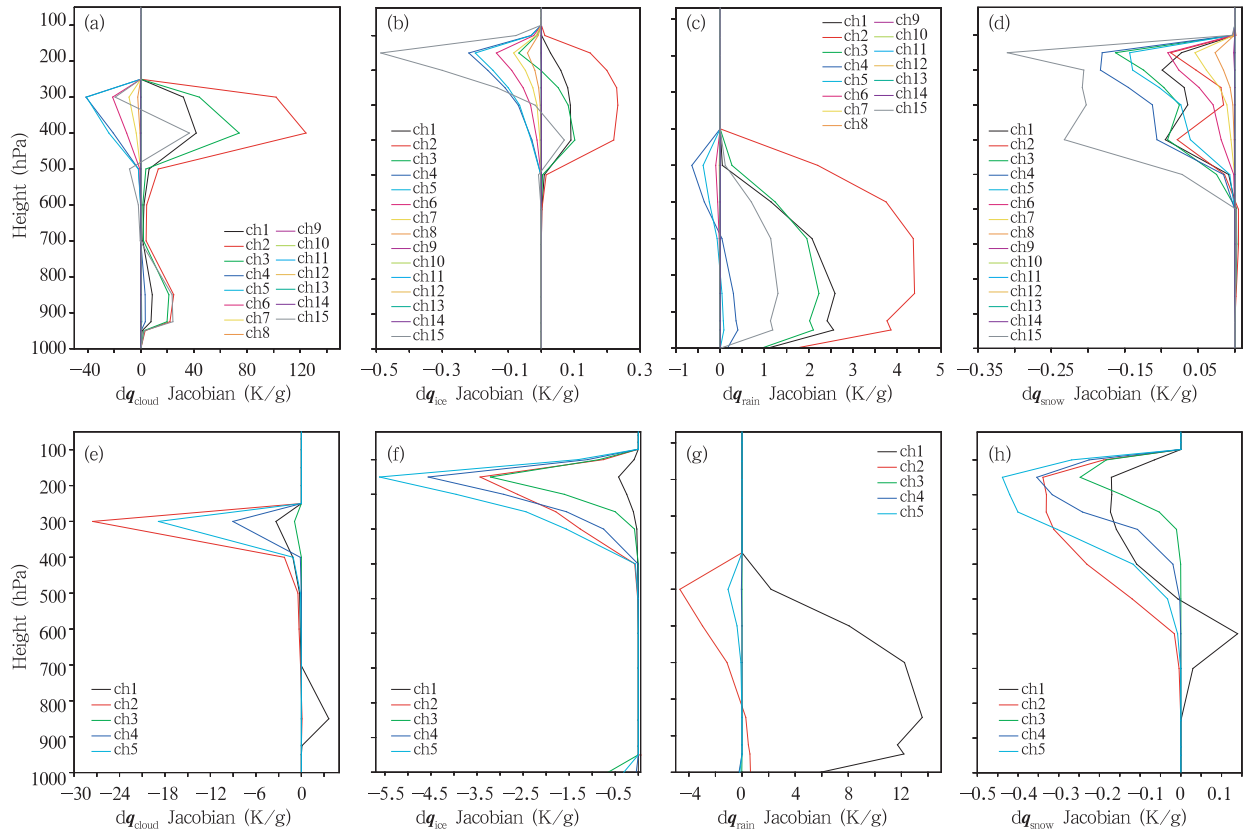


图 7 台风中心区域 CRTM 水成物 AMSUA/B 各探测通道响应函数
(a,b,c,d. AMSUA 云水、冰水、雨水、雪,e,f,g,h. AMSUB 云水、冰水、雨水、雪)

Fig. 7 As in Fig. 6 but for CRTM

与 RTTOV 基本一致。响应函数和水成物本身的分布层次对应较好,云水和雨水的响应函数主要分布在中下层,冰水和雪则分布在中上层。CRTM 中云水、冰水和雨水的响应函数均较 RTTOV 大,尤其是冰水相差达到一个数量级。CRTM 云水响应函数最大值在 AMSUA 2 通道达到 115 K/g,而 RTTOV 的相应数值只有 24 K/g。CRTM 雨水响应函数约为 RTTOV 的 2 倍,而雪的响应函数略小于 RTTOV。对 AMSUB,除了云水和雨水的第 1 通道,4 种水成物的响应函数均为负值,和明显的散射效应对应。相对于 RTTOV,CRTM 云水响应函数数量级略大,其余水成物响应函数的大小两个模式的结果基本相当。

5.2 亮温偏差区域平均

结合伴随模式输出的水成物响应函数和 AMSUA/B 各通道的探测特性,进一步分析水成物辐射效应对快速辐射传输模式模拟卫星亮温的影响。图

8 为 AMSUA/B 20 个通道考虑水成物辐射效应与不考虑水成物辐射效应模拟亮温偏差的区域平均,图 8a,b 中 cloud、ice、rain、snow 和 4wat 分别代表 RTTOV、CRTM 对云水、冰水、雨水、雪水以及全部 4 种水成物情况下的模拟结果,图 8b 中 5wat 代表 CRTM 在 4 种水成物外加入霰后 5 种水成物情况下的结果,ice * 10 表示把冰水的结果量级放大了 10 倍,横坐标轴 1—15 对应 AMSUA 的 1—15 通道,16—20 对应 AMSUB 的 1—5 通道(下同)。

分析 RTTOV 的模拟结果(图 8a)可知,对 AMSUA,在峰值能量贡献高度较低的通道 1、2、3 和 15,云雨粒子的敏感性较强,其辐射效应占据主导地位。微波低频区液态水滴和云粒子的发射作用使得亮温升高,尤其是在敏感性最强的 2 通道,云雨粒子辐射效应带来的偏差达到最大。由于冰水和雪的响应函数绝对值较小,同时大气低层含量小,其辐射效应对亮温偏差影响也较小。在 4—7 通道,随着

峰值能量贡献高度的上升,水成物的响应函数多为负值,粒子的散射作用占据主导地位,对模拟亮温产生一致的降温作用。云雨粒子辐射效应对亮温偏差的影响明显减小,冰雪粒子的影响增大。这是由于云雨含量急剧减少,雪水含量有了明显增加,同时雪的有效粒子半径较大,在该层次上的响应函数也较大,其散射作用在这些通道得到了有效体现。但是,冰的散射作用体现仍然不明显。通道8—14属于高层探测通道,在其峰值能量贡献高度上水成物的含量都很低,水成物的辐射效应在这些通道基本没有明显表现。对 AMSUB,除了云水在1通道外,水成物的考虑对通道模拟亮温均起到降温作用。在通道1和2,由于峰值能量贡献高度在地表附近,云雨粒子敏感性较强,其辐射效应对亮温有明显影响。同

时,雪的散射效应对亮温的降温作用明显,这是因为通道探测频率较高,穿透性能较差,即便在无云情况下,下垫面微波辐射也无法穿透饱和和海洋大气,卫星探测到的辐射多来自大气本身,当大气水成物含量较大时,大粒子的散射效应对亮温的降低作用会更加显现出来。通道3—5,随着峰值能量贡献高度的上升,云雨粒子敏感性的下降以及水成物含量的减小,对通道亮温的影响变小。冰和雪含量加大,敏感性也不断加强,对亮温影响明显。全部水成物的考虑使得 AMSUB 所有通道模拟亮温降低,尤其是在通道2降温最大,达到 -2.5 K 。

从 CRTM 的模拟结果(图 8b)可知,水成物对卫星亮温模拟的影响具有和 RTTOV 一致的特征,但是量级上有较大的差别。对 AMSUA,在峰值能

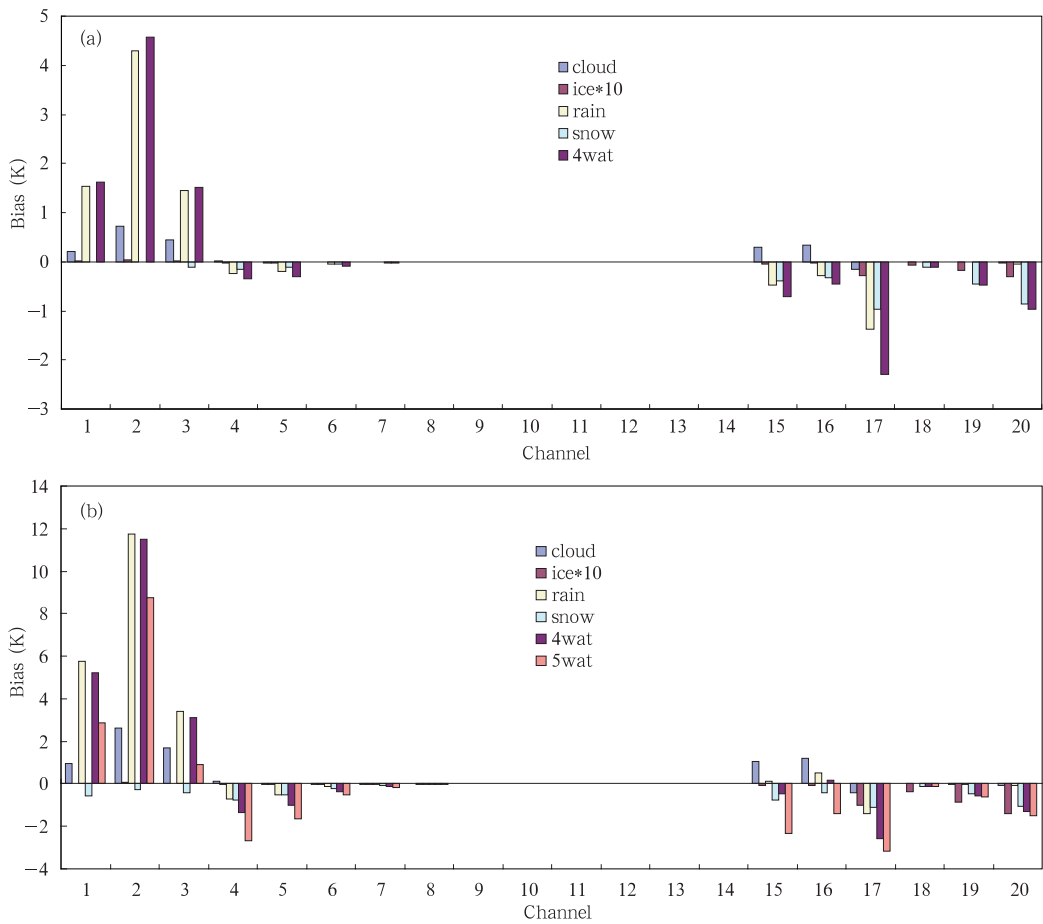


图 8 AMSUA/B 的 20 个通道考虑水成物辐射效应与不考虑水成物辐射效应的区域平均模拟亮温偏差 (a. RTTOV, b. CRTM)

Fig. 8 Area average of simulated bright temperature bias between the calculations with and without hydrometer for 20 AMSUA/B channels (a. RTTOV, b. CRTM)

量贡献高度较低的通道 1—3 和 15,云雨粒子的辐射效应同样占据主导地位,对亮温起到一致的增温作用,尤其是雨水的增温效应非常明显,最大值在通道 2 接近 12 K,RTTOV 雨水在该通道的增温不到 4.5 K,这与 CRTM 模式对雨水的敏感性较 RTTOV 更强相对应。从通道 4—7,随着峰值能量贡献高度不断上升和通道探测频率的加大,水成物辐射效应对模拟亮温影响逐渐减小。相对而言,雪对亮温的降温幅度增大,最大值在敏感性最大的 4 通道接近 -1 K。对 AMSUB,除 1 通道外,水成物辐射效应的考虑同样对亮温模拟均起到一致的降温作用,尤其是在峰值能量贡献高度较低的通道 2 最为明显。与 RTTOV 比较来看,最大的不同在于雨水的加入对 CRTM 模式 1 通道亮温产生了接近 1 K 的增温,导致考虑全部 4 种水成物后,模拟亮温相对晴空条件略有增高。

目前,RTTOV 和 CRTM 两个模式的一个不同

之处在于 RTTOV 仅能考虑云、雨、冰和雪 4 种水成物,而 CRTM 还可以考虑霰和雹的辐射效应,文中也计算了 CRTM 加入霰之后的结果(图 8b)。在 AMSUB 1 通道中,台风中心区域卫星实际观测有一亮温低值区,而仅仅考虑云、雨、冰、雪 4 种水成物辐射效应则在亮温模拟结果上很难明显地表现这一特征(图 4e 和 5e),这与此 4 种水成物在 AMSUB 各通道只有较小的降温效应相对应。而霰的考虑能够使得模拟亮温明显降低,在台风中心区域出现模拟亮温的低值区(图 5f)。说明 CRTM 对水成物辐射效应的考虑比 RTTOV 更完善一些。

5.3 亮温偏差区域均方根误差

图 9 进一步给出了 AMSUA/B 20 个通道考虑水成物辐射效应与不考虑水成物辐射效应亮温模拟偏差的区域均方根误差统计。对 RTTOV,云水和雨水对 AMSUA/B 模拟亮温的影响在窗区通道体现得最明显,包括 AMSUA 的 1—5 通道、15 通道和

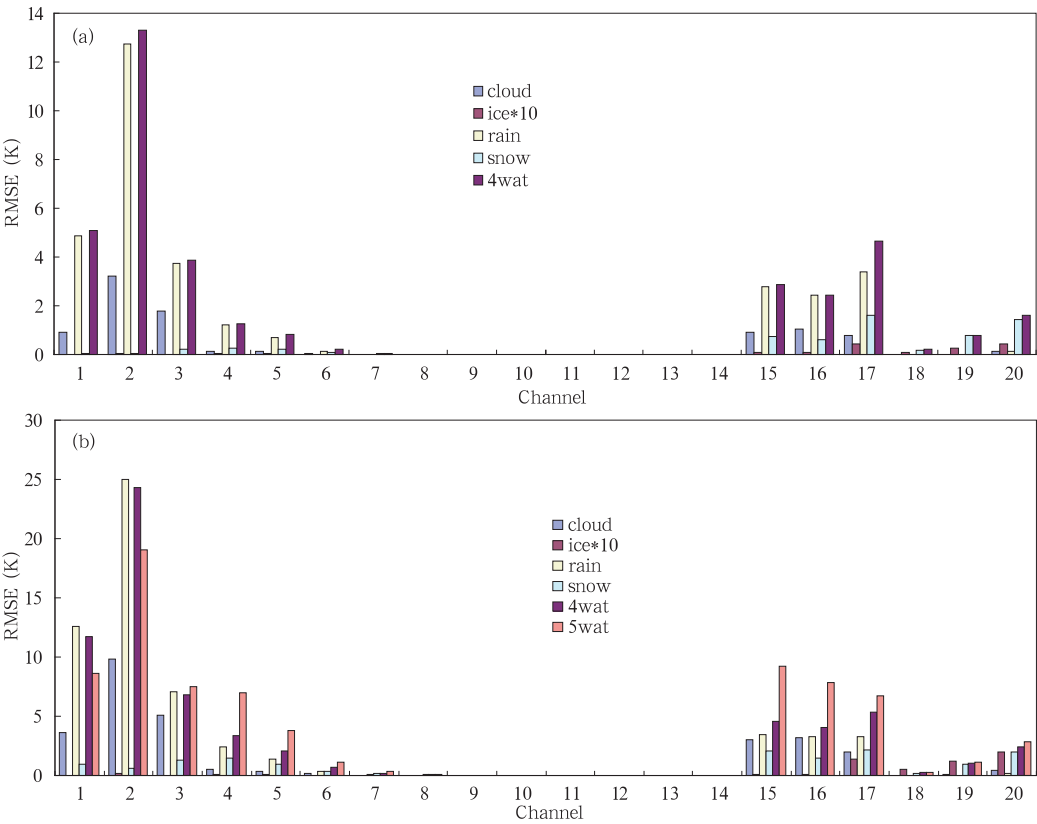


图 9 AMSUA/B 20 个通道考虑水成物辐射效应与不考虑水成物辐射效应的区域平均模拟亮温偏差的均方根误差 (a. RTTOV, b. CRTM)

Fig. 9 As in Fig. 8 but for simulated root mean square errors

AMSUB 的 1、2 通道。冰和雪对亮温模拟的影响主要体现在高频探测通道, 包括 AMSUA 的通道 15 和 AMSUB 除通道 3 以外的其余 4 个通道。全部水成物辐射效应对 AMSUA 的通道 1—6 和 15 亮温模拟影响比较明显, 尤其以通道 2 最为明显, 亮温偏差区域均方根误差达到了 13.8 K。对 AMSUB, 除通道 3 外, 全部水成物辐射效应对亮温模拟的影响也都较明显, 最大值在通道 2 接近 5.8 K。

图 9b 为 CRTM AMSUA/B 20 个通道考虑水成物辐射效应与不考虑水成物辐射效应模拟亮温偏差的区域均方根误差统计。在 AMSUA 低频窗区通道, 云水和雨水的区域均方根误差同样表现明显, 云雨粒子影响最大值在通道 2, 分别达到 10 和 25 K, 大大超过了 RTTOV 的结果。同样, 对 AMSUB, 水成物辐射效应对模拟亮温偏差的均方根误差总体上比 RTTOV 要大 2—3 K。霰在 AMSUA 和 AMSUB 的窗区通道 1—3 及 AMSUA 的 4、5 通道都贡献了较大的模拟亮温偏差。

6 结论与讨论

使用欧洲中期数值天气预报中心和美国卫星资料同化联合中心发展建立的快速辐射传输模式 RTTOV 和 CRTM, 通过区域中尺度数值模式 WRF 预报的水成物含量信息, 结合雅可比模式计算得到的响应函数, 分析了各种水成物辐射效应对 AMSUA/B 卫星微波观测各通道亮温模拟的影响, 并比较了 RTTOV 和 CRTM 结果的异同。主要结论如下:

(1) 水成物辐射效应的考虑对卫星微波观测亮温的模拟具有重要的影响, RTTOV 和 CRTM 两个快速辐射传输模式计算得到的水成物响应函数和水成物辐射效应对模拟亮温偏差影响特征基本一致, 但量级上存在差异。快速辐射传输模式中水成物辐射效应的考虑为云雨区卫星资料的使用提供了技术支持。

(2) 水成物响应函数和水成物本身的分布层次对应关系良好, 云水和雨水的响应函数主要分布在中下层, 冰水和雪则分布在中上层。相对于 RTTOV, CRTM 计算得到的水成物响应函数要大一些。

(3) 对 AMSUA, 云水和雨水的辐射效应对通道模拟亮温主要以增温为主, 尤其是在低频的窗区

通道, 冰晶和雪则体现散射效应为主的降温作用。对 AMSUB, 水成物辐射效应的考虑使得模拟亮温降低, 尤其是通道 2 降温幅度最大。与水成物响应函数表征出的模拟亮温对水成物的敏感性一致, CRTM 计算出的水成物辐射效应带来的模拟亮温变化幅度大于 RTTOV。

(4) 霰粒子辐射效应带来的降温对于某些通道卫星微波观测的模拟效果具有重要作用, 目前 RTTOV 仅能考虑云、雨、冰和雪 4 种水成物, 而 CRTM 还可以考虑霰和雹的辐射效应, CRTM 对水成物辐射效应的考虑比 RTTOV 要完善一些。

需要指出两点:

(1) 快速辐射传输模式中水成物辐射效应模块的建立为卫星资料同化中实现云雨区卫星观测资料的应用提供了技术支持。但是, 通过快速辐射传输模式直接将资料引入使用仍然比较困难, 目前普遍采用的做法是先反演得到云雨区的大气参数, 再通过资料分析系统试验应用。辐射传输模式中由于水成物辐射效应不同对反演结果及应用也会带来较大差异, 需要进一步开展相关比较研究。

(2) 文中快速辐射传输模式输入使用的是中尺度模式模拟, 模式云过程还会存在一定误差, 这种对比不只是反映了辐射传输模式的问题, 也包含了数值预报模式本身的问题。考虑实际资料同化中分析背景场也是数值模式的预报场, 本文是从这一方面讨论了卫星微波观测模拟中水成物辐射效应的影响, 模拟结果的改善只是对卫星观测反映的天气系统特征而言, 定量统计则是对模拟中加入和没有水粒子辐射效应两种情况下的结果。当然, 选用卫星 Cloudsat 水成物探测资料就能够将结果直接和实际观测对比, 从另一个方面对此问题加以讨论。

参考文献

- 丁伟钰, 万齐林. 2008. “珍珠”台风卫星红外通道亮温的数值模拟. 大气科学, 32(3): 572-580
- 董佩明, 薛纪善, 黄兵等. 2008. 数值天气预报中卫星资料同化应用现状和发展. 气象科技, 36(1): 1-7
- 董佩明, 王海军, 韩威等. 2009. 水物质对云雨区卫星微波观测模拟影响. 应用气象学报, 20(6): 682-691
- 马刚, 方宗义, 张凤英. 2001. 云参数对 RTTOV5 模式模拟误差的影响分析. 应用气象学报, 12(4): 385-390
- 马刚, 邱崇践, 黎光清等. 2005. 利用 RTTOV7 快速辐射传输模式模拟风云二号红外和水汽成像通道辐射率的研究. 红外与毫米波学报, 24(5): 37-40

- 薛纪善. 2009. 气象卫星资料同化的科学问题与前景. 气象学报, 67 (6): 903-911
- Bauer P, Moreau E, Chevallier F, et al. 2006. Multiple-scattering microwave radiative transfer for data assimilation applications. Quart J Roy Meteor Soc, 132: 1259-1281
- Chevallier F, Bauer P. 2003. Model rain and clouds over oceans: Comparison with SSIM/I observation. Mon Wea Rev, 131 (10): 1242-1250
- Eyre J R. 1991. A fast radiative transfer model for satellite sounding system. ECMWF Research Dept Tech Memo, 176
- Han Yong, Van Delst P, Liu Quanhua, et al. 2006. User's guide to the JCSDA community radiative transfer model. ftp://ftp.emc.ncep.noaa.gov/jcsda/CRTM/
- Roger Saunders, Marco Matricardi, Alan Geer. 2008. RTTOV9.1 Users Guide. NWPSAF-MO-UD-016
- Wang Wei, Bruyere C, Duha M, et al. 2010. WRF-ARW version 3 modeling system User's guide. <http://www.mmm.ucar.edu/wrf/users/docs/>
- Weng Fuzhong, Liu Quanhua. 2003. Satellite data assimilation in numerical weather prediction models. Part I: Forward radiative transfer and jacobian modeling in cloudy atmospheres. Quart J Roy Meteor Soc, 25: 2639-2645
- Weng Fuzhong, Han Yon, Van Delst P, et al. 2005. JCSDA Community Radiative Transfer Model (CRTM). Proceedings of 14th International TOVS Study Conference, Beijing, China