

水物质对云雨区卫星微波观测模拟影响^{* 1}

董佩明¹⁾²⁾ 王海军³⁾ 韩 威⁴⁾ 王德英⁴⁾

¹⁾(北京航空气象研究所,北京 100085) ²⁾(中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室,北京 100081)

³⁾(解放军理工大学气象学院,南京 211101) ⁴⁾(中国气象科学研究院,北京 100081)

摘 要

受云和降水影响卫星资料在数值天气预报中的同化应用对于进一步改善数值预报效果具有重要作用,这部分工作的开展要求快速辐射传输模式中能够较好地考虑各种水物质的辐射效应。使用美国卫星资料同化联合中心新近开发的快速辐射传输模式 CRTM,通过中尺度数值模式 WRF 的预报输出提供水物质输入,分析水物质辐射效应对云雨区卫星微波观测模拟计算的影响。在 WRF 模式预报水物质的分布和天气系统配置合理并符合云物理基本特征的前提下,水物质辐射效应的考虑极大改善了卫星观测模拟的效果。结合卫星各通道探测特性,进一步分析各种水物质粒子对 NOAA-16 AMSU A/B 各通道卫星亮温模拟的影响和物理机理,定量统计各类水物质对各卫星观测通道亮温计算偏差和偏差贡献的权重大小。分析结果表明:快速辐射传输模式中,考虑水物质辐射效应为数值天气预报中云雨区卫星资料的同化应用提供了必需的基础条件。

关键词: 水物质; 辐射效应; 云雨区; 卫星观测; 快速辐射传输模式

引 言

卫星资料在数值天气预报中已经得到广泛应用并显著提高了数值预报的准确率^[1]。据欧洲数值天气预报中心(ECMWF)的统计,卫星资料占数值预报所用观测资料比例已超过 90%。但超过 97% 通过预处理的卫星资料又被丢弃在同化系统之外未加以使用,其中一个关键因素就是受云和降水的影响。ECMWF 统计还表明:因受云和降水影响而不能被同化系统使用的卫星资料占了全部丢弃资料的 75% 以上。但是,云雨区观测往往包含大量与天气系统发生发展密切相关的大气信息^[2],这些资料的同化应用将是数值预报准确率继续获得改善的重要技术途径之一。受云和降水影响卫星资料的同化成为目前数值预报中卫星资料同化应用的一个研究热点。

快速辐射传输模式是卫星辐射率资料同化系统中的关键组成。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卫星扫描仪的观测方向(扫描角),根据仪器每一探测通道

的平均光谱响应函数,可以以较高精度计算卫星的模拟探测值^[3]。晴空条件下快速辐射传输模式对卫星观测模拟已经能够达到相当高的精度,而由于水物质粒子辐射效应的复杂性,对其考虑成为快速辐射传输模式的主要发展内容之一。包括目前应用最广和最具代表性的两个模式——欧洲和美国开发建立的 RTTOV 和 CRTM,都分别发展了水物质辐射效应的相应模块,为云雨区卫星资料的同化应用提供条件^[4]。

本文利用快速辐射传输模式 CRTM,针对 NOAA-16 AMSU A/B 卫星观测,分析了水物质辐射效应对卫星微波观测模拟计算的影响。

1 快速辐射传输模式 CRTM

CRTM(Community Radiative Transfer Model)是美国卫星资料同化联合中心近年来开发建立的一个快速辐射传输模式,目标是利用其实现数值天气预报中全天气条件下卫星资料的同化应用,对受云和降水影响卫星观测的模拟计算能力是模式设

* 国家自然科学基金项目(40775027,40605015)、中国气象科学研究院基本科研项目(2008Z003)和科技部公益研究专项“青藏高原中尺度卫星资料同化技术与系统研究”(2005DIB3J112)共同资助。

2009-05-18 收到,2009-08-05 收到再改稿。

计的一个突出特点^[5]。CRTM 中粒子散射模块包括了云粒子散射和气溶胶粒子散射模块,考虑了云和降水的辐射效应。CRTM 中云的光学参数是通过通用的 Mie 理论利用分布函数计算,诸如消光系数、散射比和相函数这些参数事先计算出来制成查询表,依据粒子的平均大小和云水含量(或混合比)进行查询。相函数在计算中分解成一系列的勒让德多项式,和多项式相联系的系数储存在表中。云水和云冰通过水或冰介电常数而不同对待。对降水散射的计算,也是通过 Mie 理论用分布函数计算降水的光学参数。依据粒子的平均大小和雨水含量(或混合比)从预先计算好的查询表中查询消光系数、散射比、勒让德系数等参数。当前 CRTM 中处理的水物质类型包括云水、雨水、云冰、雪、霰和雹,还没有处理非球形的云冰粒子。目前 CRTM 已接入了中国气象科学研究院发展建立的 GRAPES-3DVar^[6-7] 同化系统中。

CRTM 模式在计算云雨区大气辐射时,输入的云参数包括^[8]:① 水物质类型:云水、雨水、冰水、雪、霰和雹,各种水物质可以分别加入,也可以一起考虑;② 水物质含量:根据选取的水物质类型,输入模式层上该类型水物质的含量;③ 粒子有效半径;④ 有效半径变化:表征水物质粒子大小尺度分布范围^[9]。

2 输入水物质特征

研究个例选取的是 0716 号强台风罗莎,该台风是 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 个登陆我国的台风。

CRTM 水物质输入采用中尺度数值模式 WRF 的预报输出。使用 WRF 模式自 2007 年 10 月 2 日 18:00(世界时,下同)开始积分,模式初始场由 T213 资料插值生成,预报水平区域中心点为 19°N, 130°E,双重嵌套网格,粗网格格距为 54 km,格点数为 101×85,细网格格距为 18 km,格点数为 151×124。云物理过程显式方案选用 Lin 方案,该方案考虑 6 类水汽相态,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。

利用公式 $R = \frac{1}{g} \int_0^{p_0} q dp$ 对各种水物质模式预

报输出进行整层积分得到单位面积整层含量分布。图 1 是细网格 24 h 预报 10°~28°N, 120°~140°E 区域内云水、雨水、冰水、雪和霰整层积分结果。由图 1 可见,云水分布与台风螺旋云系相似,不过大值区相对集中,主体位于台风眼区北侧,整层含水量中心最大值达 1.8 kg·m⁻²。雨水分布比较集中,最大值达 4 kg·m⁻²。云冰的分布最为广泛,主体主要分布于台风西南侧,且有明显的台风外围螺旋带,在 19°N, 127°E 附近有一个明显的空洞,与台风中心所在位置一致,整层含冰量最大值为 0.3 kg·m⁻²。雪、霰的分布也较广并形成环状,主体位于台风西侧,整层含雪量最大值为 0.33 kg·m⁻²。霰的整层含量分布与雨水整层含量分布较为相似,但环状较之明显,整层含霰量最大值为 1.2 kg·m⁻²。水物质的分布整体来看与台风系统配置合理。

沿 127°E 作相应时刻云水、雨水、冰水、雪、霰含量经向垂直剖面(图略),可以看到云水大部分分布在 0 °C 以下的区域,只有少部分受台风强上升气流提升而超越 0 °C 线,最高达到 450 hPa 附近。云水两个大值中心分别位于 700 hPa 和 850 hPa, 700 hPa 大值中心云水含量达到 0.5 g·m⁻³。雨水粒子的直径较大,它们在空中向下降落。剖面图中雨水分布在地面到 500 hPa 高度范围内,宽度约有一个纬度,水平分布比较集中,最大含水量达 0.6 g·m⁻³。冰水分布在对流层上部温度低于 0 °C 的区域,位于 400 hPa 到 100 hPa 高度范围之间,主体在 250 hPa 附近,中心最大值达到 0.065 g·m⁻³。由于冰水随气流移动,其空间分布在水平方向上从台风中心向外围有一定延展。雪的分布和冰水分布大致相同,但总体略低,分布在 500 hPa 到 150 hPa 之间,主体在 250 hPa 附近,中心最大值为 0.055 g·m⁻³。和冰水相似,雪的分布也从台风中心向外围有一定范围的延展。霰分布在对流层中上部,主体位于 0 °C 以上 500 hPa 附近,中心最大值达到 0.1 g·m⁻³。总的看来,模式输出水物质的特征符合云物理的基本特点^[10]。

CRTM 的计算还需输入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研究方法,通常的处理方法是不考虑云的微物理结构,只是笼统地将有效半径定义为常数。譬如欧洲

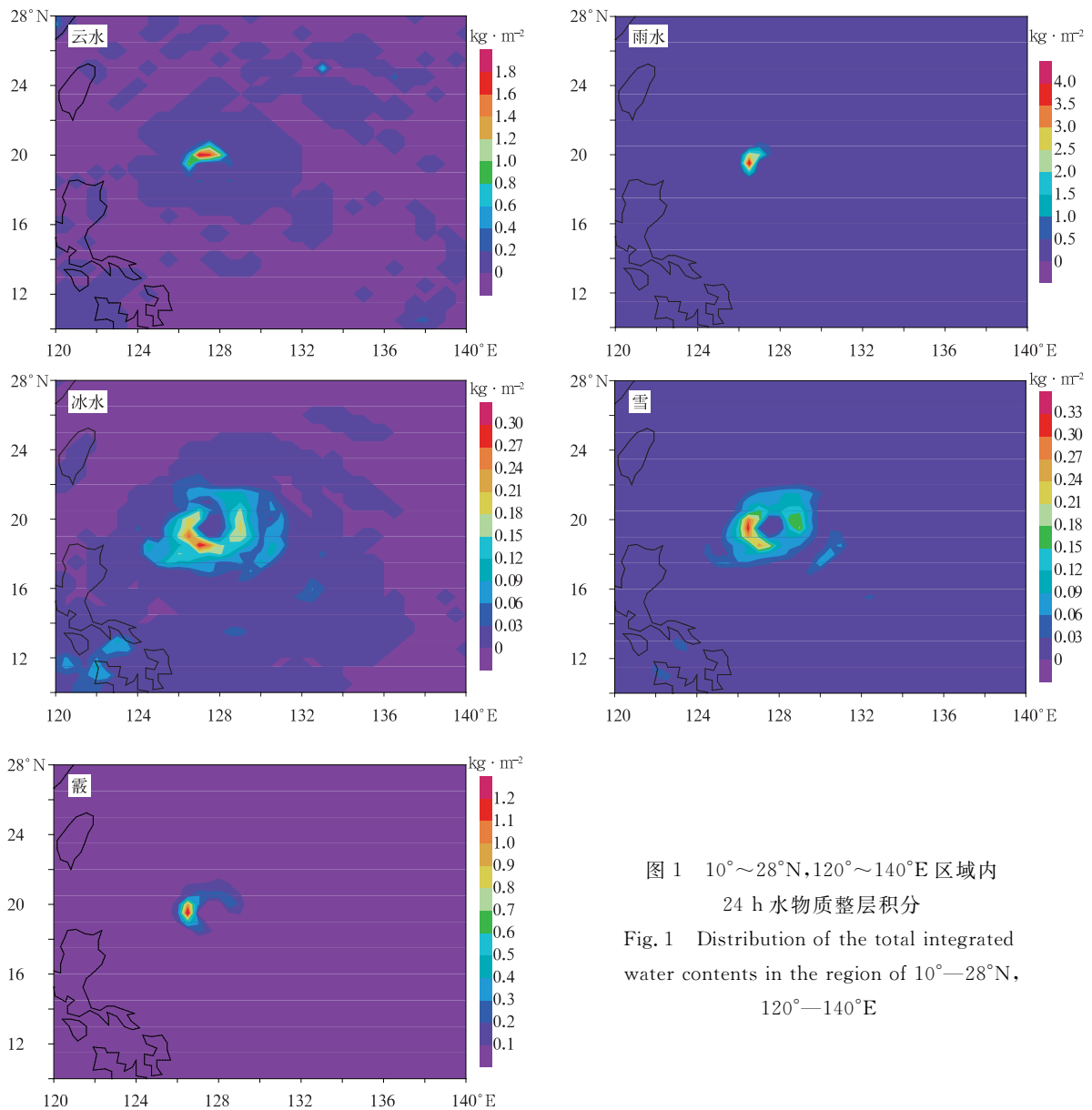


图1 10°~28°N, 120°~140°E 区域内
24 h 水物质整层积分
Fig. 1 Distribution of the total integrated
water contents in the region of 10°—28°N,
120°—140°E

中期天气预报中心业务模式中液态水云滴的有效半径定义为 $15 \mu\text{m}$, 英国气象局统一模式中水云滴的有效半径取为 $10 \mu\text{m}$, Petch^[11] 的研究中冰晶的有效半径取为 $30 \mu\text{m}$ 。本研究设定云水、雨水、冰水、雪和霰的有效半径分别为 $15 \mu\text{m}$, $100 \mu\text{m}$, $100 \mu\text{m}$, $200 \mu\text{m}$ 和 $150 \mu\text{m}$ 。目前 CRTM 暂时将有效半径变化处理为常数。

3 水物质辐射效应对卫星观测模拟效果的改善

将模式输出的大气温度和水汽廓线输入快速辐

射传输模式, 结合卫星观测所在经纬度和扫描角参数, 模拟亮温是在不考虑水物质情况下的计算值, 即目前卫星资料同化中暂时不考虑云和降水影响时的使用方法。与 CRTM 输入中加入各种水物质参数的计算结果并同实际卫星观测的比较可知, 考虑水物质辐射效应对卫星观测模拟效果有改善。限于篇幅, 只给出 NOAA-16 AMSU A 和 AMSU B 通道 1 的计算结果(图 2 和图 3)。可以看到, 不考虑水物质辐射效应的计算亮温与实际卫星观测有较大偏差, 特别是在台风中心区域。水物质辐射效应的考虑能够较大程度改善快速辐射传输模式对卫星观测的模拟效果, 结果接近真实卫星观测的特征。

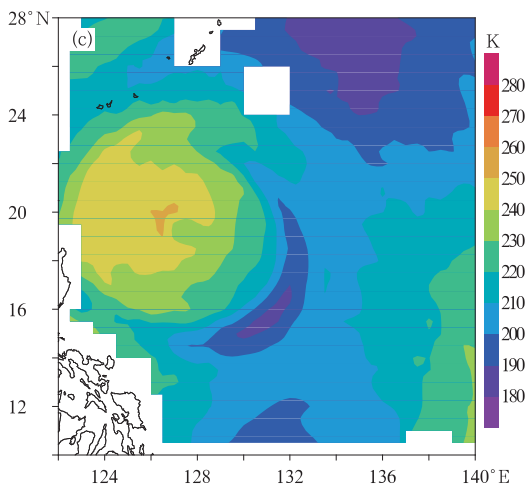
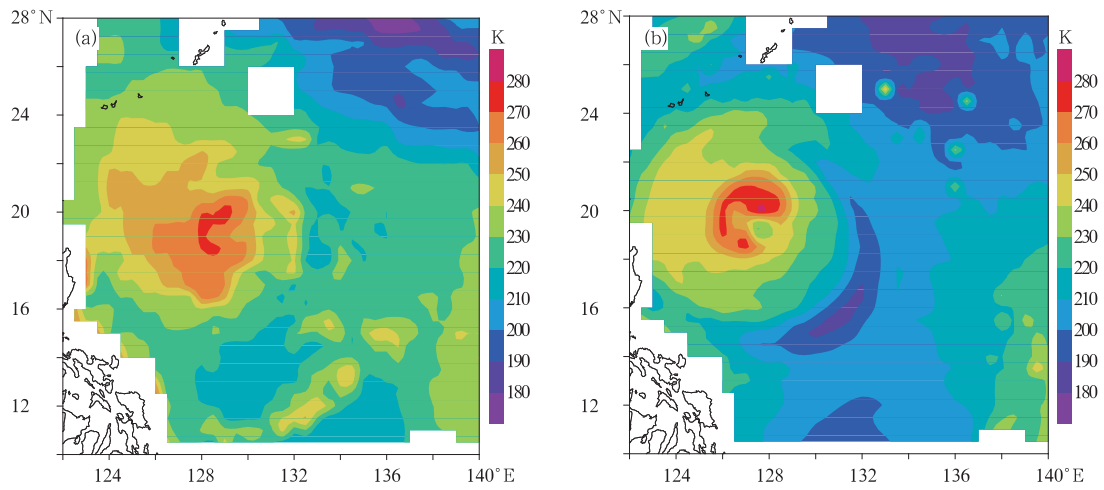


图 2 AMSU A 通道 1 观测与模拟亮温
(a) 观测, (b) 考虑全部水物质, (c) 不考虑水物质
Fig. 2 Observed and simulated bright temperature for AMSU A Channel 1
(a) observation, (b) with all water contents, (c) without water contents

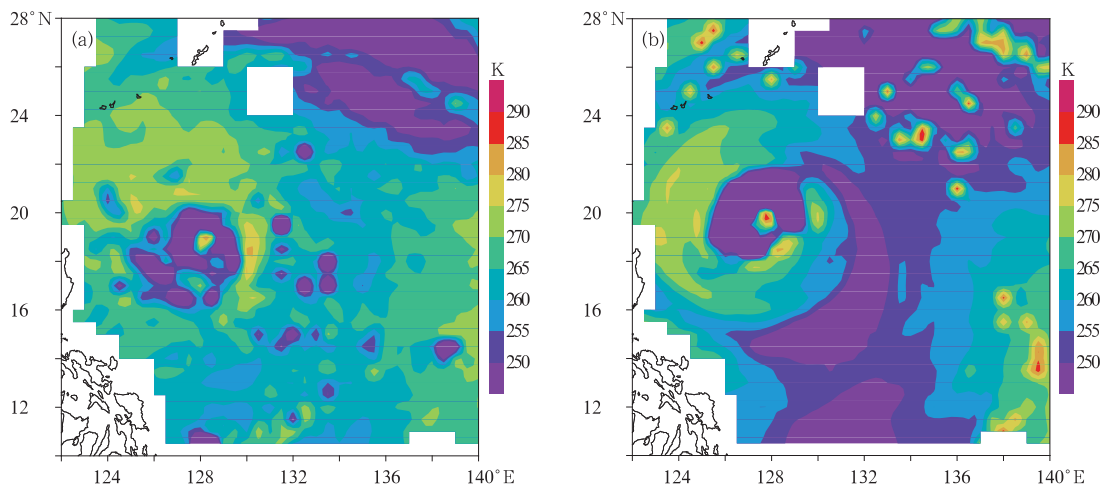
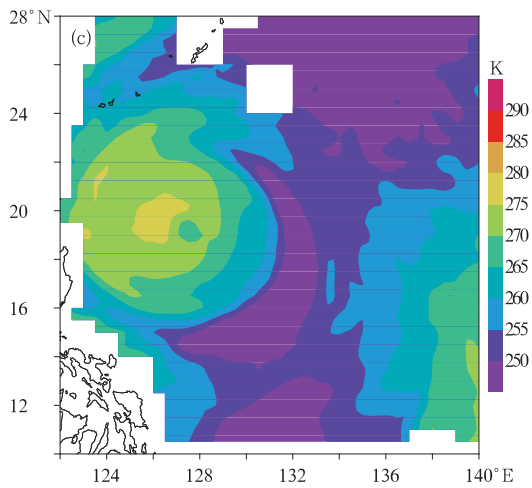


图 3 AMSU B 通道 1 观测与模拟亮温
(a) 观测, (b) 考虑全部水物质, (c) 不考虑水物质
Fig. 3 Observed and simulated bright temperature for AMSU B Channel 1
(a) observation, (b) with all water contents, (c) without water contents



续图 3

4 水物质对卫星亮温模拟的影响

4.1 区域平均偏差统计

选取台风中心区域(17°~22°N, 125°~130°E),

计算 AMSU A/B 20 个通道考虑水物质辐射效应与不考虑水物质辐射效应模拟亮温偏差的区域平均, 结果如图 4 所示。

AMSU A 的通道 1 (23 GHz)和通道 2 (31 GHz) 中全部水物质辐射效应的考虑均使台风中心模拟亮温升高, 区域平均达 10 K 的量级。其中, 云雨粒子的辐射效应占主导地位。AMSU A 的通道 1 和通道 2 属于窗区通道, 穿透性较好, 当大气中液态水含量不高时可以清楚感知下垫面的微波信号, 而海面的微波发射率较低, 因此其亮温就较低。随着从台风外围到台风中心液态水含量的增大, 由于微波低频区液态水的发射作用要大于散射作用, 云滴和雨滴的发射作用逐渐显现, 使得亮温迅速升高。冰、雪、霰的散射作用在探测低频率段对模拟亮温的影响较小, 其中雪和霰的散射作用分别使亮温降低, 冰的散射作用表现为略增温。

AMSU A 的通道 3 (50 GHz)中全部水物质辐射效应的考虑使台风中心大部分区域的模拟亮温降

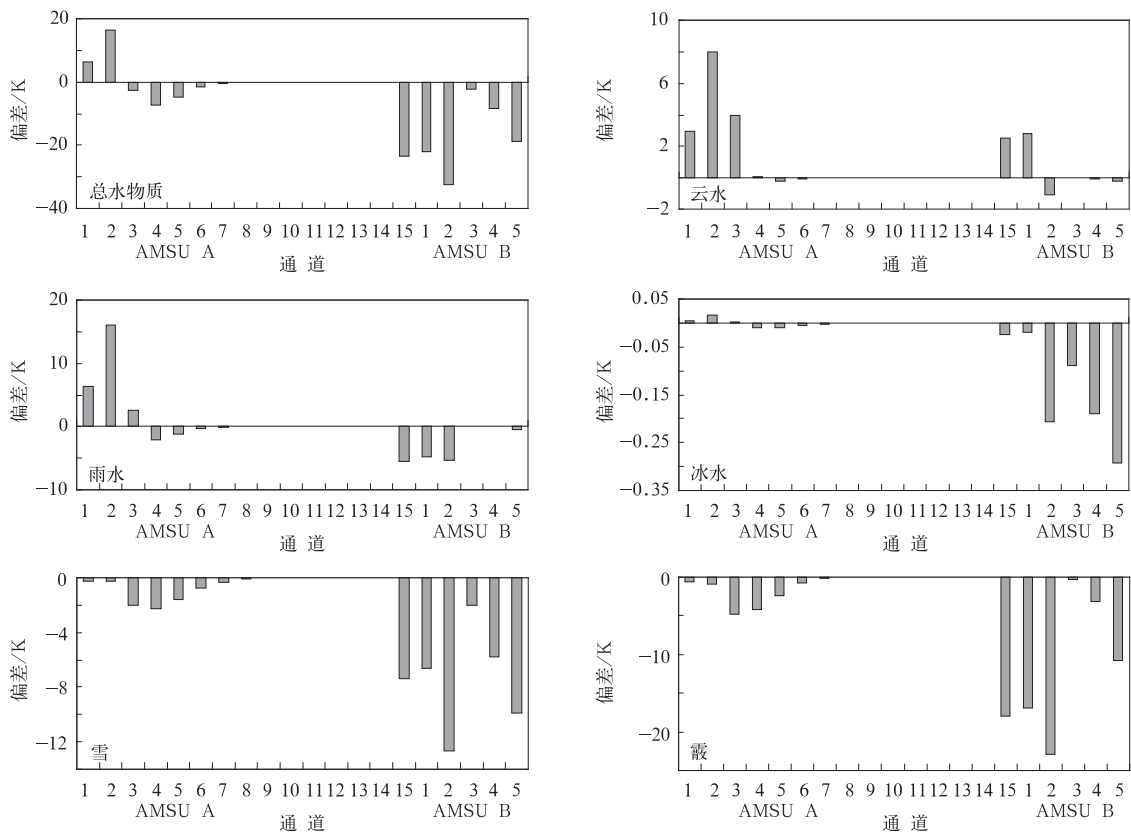


图 4 考虑水物质辐射效应与不考虑水物质辐射效应模拟亮温偏差区域平均

Fig. 4 Area average of simulated bright temperature bias between the calculation with and without water contents

低。其中,云水和雨水对模拟亮温起增温作用,云水的加入对模拟亮温的增加幅度与通道 1 相似,加入雨水后模拟亮温呈现出从台风外围到台风中心亮温逐渐升高又逐渐降低的现象。AMSU A 的通道 3 也属于窗区通道,随着云层液水含量的增加,云水和雨水的发射作用使亮温升高。但是与此同时云水和雨水的微波发射权重函数峰值上移。当液态水含量较大时,微波发射权重函数峰值的上移会使得辐射亮温开始出现下降趋势^[12]。雪和霰的散射作用在通道 3 得到了较明显的体现,均使模拟亮温降低,霰的作用要大于雪。冰的散射作用没有明显体现。

在通道 4 中,全部水物质辐射效应的考虑使台风中心模拟亮温降低,最大值接近 -10 K。其中云水、雨水对该通道的影响变小,雪和霰的降温作用明显,体现出雪和霰在该通道的散射作用,冰水的散射作用依旧不明显。

通道 5 的峰值能量贡献高度在 700 hPa,全部水物质辐射效应的考虑使台风中心模拟亮温降低,各种水物质的作用也是一致降温,同样是雪和霰的表现较明显,冰的散射作用相对较小。该通道的峰值能量贡献高度比通道 4 略高,通道中心频率与通道 4 相差不大,所以云水和雨水的辐射效应在该通道中的体现比通道 4 稍弱,雪和霰的散射作用与通道 4 相比相差不大。

对通道 6~7,全部水物质的加入也使得台风中心模拟亮温降低,降温的幅度小于通道 5。这两个通道雪的散射作用使模拟亮温降低体现得最明显,其次为霰,云水和雨水次之,冰水的散射作用依然不明显。这是由于雪和霰的有效半径比较大,在这些层次中雪和霰由于有效半径大而体现出比较明显的散射作用。可以看出,正是由于在通道 5~7 这些非窗区通道,微波探测仍然受到云雨的影响,目前卫星资料同化中需要借助于云检测方法判识观测受云影响的严重程度来决定这些通道资料的取舍^[13-15]。

AMSU A 通道 8~14 属于高层探测通道,水物质在其峰值能量贡献高度上含量都较低,水物质的辐射效应在这些通道不明显。

AMSU A 的通道 15 (89 GHz) 又是窗区通道,考虑全部水物质辐射效应使台风中心模拟亮温大幅降低。云水和雨水的影响相反,云水增温而雨水降温,后者降温的幅度大于前者。冰晶、雪和霰的加入都使得台风中心模拟亮温减小,其中冰晶影响很小,雪的影响增大,霰的效果最为显著。在通道 15,霰、

雪的整层含量虽小于雨水和云水,但对模拟亮温的降低作用大大超过了云水和雨水,其中的原因在于虽然通道 15 也是窗区通道,但由于通道 15 频率高,水物质对通道 15 的散射作用得以显现,尤其是大粒子的散射效应对亮温的降低作用明显。

对 AMSU B 而言,通道 1 (89 GHz) 的通道性质与 AMSU A 通道 15 (89 GHz) 相似。在 AMSU B 的通道 2 (150 GHz),全部水物质的加入对模拟亮温也起到降低作用,其中雪和霰的散射作用对台风中心亮温的影响最为明显,云水和雨水次之。通道 2 (150 GHz) 虽然也是 AMSU B 的窗区通道,但与通道 1 (89 GHz) 不同,对于 150 GHz 来讲,其透明度差,即便在无云的情况下,下垫面微波辐射也无法穿透饱和海洋大气,卫星探测到的辐射多来自大气本身,当大气水物质含量较大时,大粒子的散射效应对亮温起降低作用更明显^[16-17],故水物质的影响通道 2 较通道 1 的量级要大。

AMSU B 的通道 3 (183 ± 1 GHz)、通道 4 (183 ± 3 GHz)、通道 5 (183 ± 7 GHz) 位于水汽吸收带上,液态水吸收特征明显,同时较高频率也决定了通道对水物质粒子散射敏感。全部水物质的辐射效应均使这 3 个探测通道的台风中心模拟亮温降低,只是降温幅度有大小差别。通道 3 中全部水物质辐射效应的考虑使模拟亮温降低最少。由于峰值能量贡献高度较高,云水、雨水对其影响很小,冰水、雪、霰中以雪的散射作用体现得最为明显。通道 4 的峰值能量贡献高度虽然在 600 hPa,但该通道对水物质的响应高度在 7 km 左右^[14],云水、雨水分布层次较低,对模拟亮温的影响很小。该通道中霰和雪的散射作用体现比较明显,冰水的散射作用也有所体现,水物质的整体降温作用大于通道 3。

随着通道 5 的峰值能量贡献高度的降低,云水、雨水对微波的吸收而使得模拟亮温降低作用逐渐体现出来,不过仍是雪和霰的散射作用占据主导位置。相对通道 4,冰水的散射作用有所增强,这与通道 5 对水物质的响应高度比通道 4 低,且通道 5 的通道频率比通道 4 高有关。

总的说来,从天气系统区域平均的角度讲,全部水物质的辐射效应使 AMSU A 的通道 1~2 明显增温,其中通道 2 增温最为明显,区域平均值超过 15 K。水物质对 AMSU A 的通道 3~8、通道 15 和 AMSU B 的全部通道则表现出一致的降温作用,这种降温影响在 AMSU A 除通道 15 外幅度都较小。

而对于 AMSU B,除通道 3 外都较大,尤其是通道 2,区域平均降温达到了 -30 K 左右。

单独分析每种水物质辐射效应的影响可以看到,云水和雨水的作用主要以增温为主,而且增温作用主要体现在 AMSU A 的低频窗区通道,在通道 2 最为明显。不过由于含水量、粒子属性和探测频率不同,使得它们在各通道的作用也表现出一定差异。在 AMSU A 的低频窗区通道 1~3 中,由于雨水含量高,雨水的增温作用均大于云水。在 AMSU A 的高频窗区通道 15 和 AMSU B 的通道 1 中,云水的增温作用要大于雨水。冰、雪、霰的辐射效应对模拟亮温的影响体现为以散射效应为主的降温作用,这种降温作用主要体现在 AMSU A/B 探测中心频率较高的通道,包括 AMSU A 的通道 15 (89 GHz) 和 AMSU B 的通道 1~5 (89~190 GHz)。相比之下,霰的降温作用最大,雪次之,冰的降温作用最小。另外还可以看到,冰、雪、霰的降温作用在 AMSU B 的窗区通道 2 (150 GHz) 中均比通道 1 (89 GHz) 要强一倍左右。而在 AMSU B 的通道 3~5 中,冰、

雪、霰的降温作用随通道中心探测频率的增加体现得越来越明显,它们在通道 5 对模拟亮温的降温作用较通道 3 超过 3 倍以上。这与随着通道中心频率的增高,水物质散射效应越来越强的探测特性相一致。

4.2 区域均方根误差统计

图 5 为考虑和不考虑水物质模拟亮温的区域均方根误差统计。全部水物质辐射效应对 AMSU A 的通道 1~6, 15 模拟亮温的影响比较明显,其中尤以通道 2 和 15 最为明显,模拟亮温均方根误差超过了 30 K。对 AMSU B 而言,全部水物质辐射效应的影响在除通道 3 以外的 4 个通道中都比较明显,其中以在通道 2 中体现得最为显著,模拟亮温均方根误差接近 55 K。

云水和雨水对 AMSU A/B 模拟亮温的影响主要体现在窗区通道,包括 AMSU A 的通道 1~5, 15 和 AMSU B 的通道 1~2, AMSU A 的通道 2 模拟亮温均方根偏差最大,云水辐射效应带来的均方根误差达到近 20 K,雨水的均方根偏差约 30 K 左右。

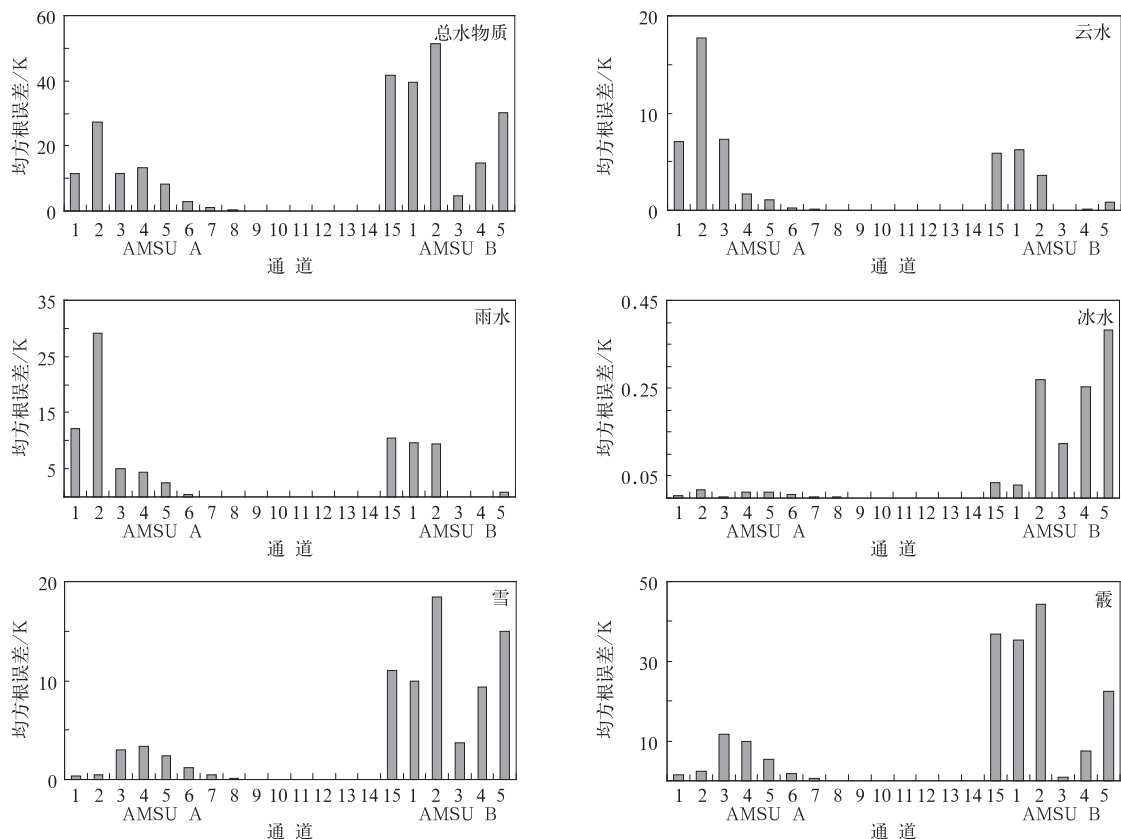


图 5 考虑水物质辐射效应与不考虑水物质辐射效应模拟亮温偏差的区域均方根误差

Fig. 5 Area average of simulated bright temperature RMSE between the calculation with and without water contents

冰、雪、霰辐射效应带来亮温的改变主要体现在 AMSU A/B 的高频通道,包括 AMSU A 的通道 15, AMSU B 除通道 3 以外的 4 个通道,其中以 AMSU B 通道 2 最为明显。在这个通道中霰的影响最大,其均方根误差达 45 K,雪的效应达 20 K,冰仅在 0.3 K 左右。

4.3 水物质影响贡献统计

图 6 给出了各种水物质辐射效应导致模拟亮温变化在各个通道中所占的百分比,目的是直接清晰地表现不同水物质辐射效应在各通道对模拟亮温影响的相对大小。AMSU A 通道 11~14 峰值权重函数较高,水物质影响基本没有表现,图中略去。

在 AMSU A 窗区通道 1~4 中,云水和雨水的辐射效应所占比例最大,在通道 1 和通道 2 中它们的贡献占据了所有水物质辐射效应的 98%,且雨水效应都大于云水。随着通道中心频率的升高,冰水、雪、霰所占百分比逐渐增大,雪、霰的贡献分别从 1% 增加到 17% 和 51%,云水和雨水所占百分比则迅速减小,分别从 34% 和 57% 降低到了 9% 和 23%。

从通道 5 到通道 10,随着通道峰值能量贡献高

度的增加,云水和雨水所占百分比逐渐减小,从通道 5 的 9% 和 21% 一直减小到 0。冰、雪、霰所占百分比随着通道峰值能量贡献高度的增加出现不一致的变化。其中分布层次较低的霰的比例逐渐减小,从通道 5 的 49% 减小到 20%。分布层次较高的冰和雪贡献百分比逐渐增加,其中以雪的增幅最为明显,从 21% 增加到 80%,在通道 8~10 中,雪所占比重已超过一半以上。

在 AMSU A 通道 15 和 AMSU B 通道 1~2 中,雪和霰贡献所占比重较大,其中尤以霰的最大,均在 50% 以上。云水、雨水的辐射效应占 10% 左右。

AMSU B 的水汽吸收通道 3~5,冰、雪、霰的贡献随着通道中心频率的增加而出现不同变化,其中霰的贡献逐渐增加,从 20% 增加到 57%,冰水和雪的贡献逐渐降低,分别从 3% 和 77% 降到 1% 和 38%。此外,随着通道 3~5 中心频率偏离水汽吸收峰的距离递增,发射权重函数渐低,在通道 3 和通道 4 中没有贡献的云水和雨水辐射效应在通道 5 增加到 2%。

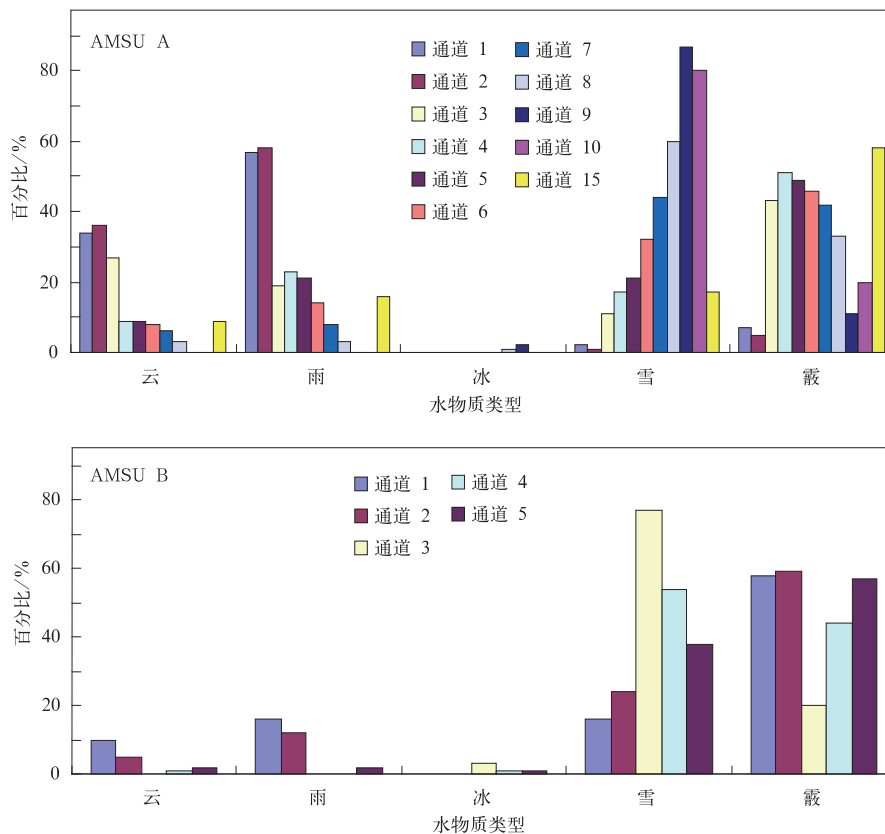


图 6 各种水物质辐射效应导致模拟亮温变化在各个通道中所占百分比

Fig. 6 The percent of REMS brought by each kind of water content for AMSU A/B

5 小结与讨论

使用美国卫星资料同化联合中心新近开发的快速辐射传输模式 CRTM, 通过中尺度数值模式 WRF 的预报输出提供水物质输入, 针对 NOAA-16 AMSU A/B 卫星观测, 分析了各种水物质辐射效应对卫星微波观测各通道模拟亮温的影响, 得到如下结论:

1) 快速辐射传输模式中考虑水物质辐射效应能够极大程度地改善卫星观测模拟效果, 这为数值天气预报中云雨区卫星资料的同化应用提供了必需的技术支持。

2) 全部水物质辐射效应的考虑使卫星模拟亮温在 AMSU A 的通道 1~2 增温, 其中通道 2 增温最为明显。水物质对 AMSU A 的通道 3~7、通道 15 和 AMSU B 的全部通道则表现出一致的降温作用, 这种降温作用对 AMSU A, 除通道 15 外, 影响幅度相对较小; 而对 AMSU B, 除通道 3 外, 都相对较大, 特别是在通道 2。

3) 云水和雨水辐射效应对模拟亮温的影响主要以增温作用为主, 这种增温作用主要体现在 AMSU A/B 峰值权重函数较低的通道, 尤其是在 AMSU A/B 的窗区通道。在 AMSU A 通道 1~2, 云水和雨水的辐射效应对模拟亮温的影响占总体水物质辐射效应的 80% 以上, 对亮温模拟结果占绝对主导作用。

4) 冰、雪、霰的辐射效应对模拟亮温的影响以降温作用为主, 这种降温作用主要体现在 AMSU A/B 中心频率较高的通道。在 AMSU B 的通道 3~5 中, 冰水、雪、霰的辐射效应占全部水物质辐射效应达到 97% 以上。雪对峰值能量贡献高度较高的通道影响比较大, 霰对通道中心频率高、峰值能量贡献高度相对较低的通道贡献较大, 而冰水在各通道中的相对贡献都不大。

需要指出的是, 本研究中雨和霰粒子有效半径中取值略偏小, 不够典型, 但是取值增大后, 卫星亮温模拟效果没有目前结果与卫星实际观测接近, 这可能与 CRTM 模式输入水物质含量是由数值模式预报提供有关。关于水物质含量、垂直廓线层次及有效粒子半径变化等水物质属性对卫星亮温模拟影响的工作正在开展之中。另外, 本研究结果是针对台风个例得到的, 对不同下垫面结果会有所不同, 特

别是对复杂陆地地表, 由于复杂陆地地表辐射率的计算本身就是一个比较复杂的问题, 在窗区通道, 地表辐射和水物质辐射效应混合将增加问题讨论的复杂程度, 这也是本文选择海上天气系统的原因。对台风云系外其他云系也还需要开展相应工作, 明确其中的差别。

参考文献

- [1] Mahfouf J F, Beljaars A, Chevallier F, et al. The Importance of the Earth Radiation Mission for Numerical Weather Prediction. ECMWF Technical Memorandum, 1999: 288.
- [2] McNally A P. A note on the occurrence of cloud in meteorologically sensitive areas and the implications for advances in infrared sounders. *Q J R Meteor Soc*, 2000, 126: 689-724.
- [3] 陈渭民. 卫星气象学. 北京: 气象出版社, 2003.
- [4] 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. *气象科技*, 2008, 36(1): 1-7.
- [5] Weng Fuzhong, Han Yong, Paul Van Delst, et al. JCSDA Community Radiative Transfer Model (CRTM) // Proceedings of 14th International TOVS Study Conference. Beijing, 2005.
- [6] Dong Peiming, Liu Zhiquan, Xue Jishan, et al. The Use of ATOVS Microwave Data in the Grapes-3Dvar System // Proceedings of the 14th International TOVS Study Conference. Beijing, 2005.
- [7] 薛纪善. 新世纪初我国数值天气预报的科技创新研究. *应用气象学报*, 2006, 17(5): 602-609.
- [8] Han Yong, Paul van Delst, Liu Quanhua, et al. User's Guide to the JCSDA Community Radiative Transfer Model (Beta Version). 2005.
- [9] 陈德辉, 胡志晋, 徐大海, 等. CAMS 大气数值预报模式系统研究. 北京: 气象出版社, 2004: 85-86.
- [10] 孙晶, 楼小凤, 胡志晋, 等. CAMS 复杂云微物理方案与 GRAPES 模式耦合的数值试验. *应用气象学报*, 2008, 19(3): 315-325.
- [11] Petch J C. Improved radiative transfer calculations from information provided by bulk microphysical schemes. *J Atmos Sci*, 1998, 49: 1846-1858.
- [12] 马刚, 方宗义, 张凤英. 云参数对 RTTOV5 模式模拟误差的影响分析. *应用气象学报*, 2001, 12(4): 385-392.
- [13] Zhang Hua, Xue Jishan, Zhu Guofu, et al. Application of direct assimilation of ATOVS microwave radiance to typhoon track prediction. *Adv Atmos Sci*, 2004, 21(2): 283-290.
- [14] 任强, 董佩明, 薛纪善. 台风数值预报中受云影响微波卫星资料的同化试验. *应用气象学报*, 2009, 20(2): 137-146.
- [15] Dong Peiming, Ren Qiang, Xue Jishan. Experiment of the Use of Satellite Microwave Data Affected by Cloud in Numerical Prediction // Proceedings of the 16th International TOVS Study Conference. Brazil, 2008.
- [16] 张文健, 许健民, 方宗义, 等. 暴雨系统的卫星遥感理论和方

- 法. 北京:气象出版社,2004:193-194.
[17] Weng Fuzhong. Advances in Radiative Transfer Modeling in Support of Satellite Data Assimilation // Proceedings of the

15th International TOVS Study Conference. Maratea, Italy, 2006.

The Effect of Water Content on the Simulation of Satellite Microwave Observation in Cloudy and Rainy Area

Dong Peiming¹⁾²⁾ Wang Haijun³⁾ Han Wei⁴⁾ Wang Deying⁴⁾

¹⁾ (*Beijing Aviation Meteorological Institute, Beijing 100085*)

²⁾ (*State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081*)

³⁾ (*Institute of Meteorology, PLA University of Science & Technology, Nanjing 211101*)

⁴⁾ (*Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081*)

Abstract

Satellite data contribute to the improvement of numerical weather forecast accuracy greatly. In most current data assimilation systems, only clear-sky satellite data are used, but the observations in cloudy and rainy area have crucial information for the development and forecast of the weather system. Using satellite data affected by cloud and precipitation will be one of the effective methods to improve the accuracy of numerical forecast continuously. To achieve this target, the radiant effect modules of water content are being developed in both RTTOV and CRTM, which are two popular rapid radiant transfer models developed by EUMETSAT Satellite Application Facility on Numerical Weather Prediction (NWP SAF) and USA Joint Center for Satellite Data Assimilation (JCSDA), respectively.

Using rapid radiant transfer model CRTM, the radiant effect of water content on the simulation of satellite microwave observations in cloudy and rainy area is analyzed. The water content input of CRTM is taken from the output of the regional mesoscale model WRF. Under the circumstances that the disturbance of water content output corresponds well with the weather system and physical characteristics, the simulation of satellite observations are greatly improved by the consideration of the radiant effect of water content. Deliberating on the physical mechanism of satellite observations, the effects of different kinds of water content on the simulation of different satellite observation channels are investigated. Quantitative statistics of the bias is performed and the influencing weight of each kind of water content on each channel of NOAA 16 AMSUA/B satellite is also calculated. These results are expected to facilitate understanding the error characteristics of simulated satellite microwave observations in cloudy and rainy area and accelerate using satellite data affected by cloud and precipitation in numerical weather forecast.

Key words: water content; radiant effect; cloudy and rainy area; satellite observations; CRTM