

白翎,师春香,刘冰,等. 2014. CRTM 微波亮温模拟对地表和云参数的敏感性分析. 气象, 40(11):1363-1371.

# CRTM 微波亮温模拟对地表和云参数的敏感性分析<sup>\* 1</sup>

白翎<sup>1</sup> 师春香<sup>2</sup> 刘冰<sup>3</sup> 成璐<sup>1</sup> 杨袁慧<sup>1</sup>

1 南京信息工程大学遥感学院, 南京 210044

2 国家气象信息中心, 北京 100081

3 南京信息工程大学大气物理学院, 南京 210044

**提 要:** 利用快速辐射传输模式 CRTM 研究了微波地表发射率和微波亮温对地表参数和云参数的敏感性问题。首先利用实测的云南思茅地面和探空资料, 通过 CRTM 正演了 12 个微波通道的地表发射率和亮温, 与 AMSR-E 卫星亮温资料进行对比, 分析了模拟亮温的正演误差, 研究了地表参数对微波地表发射率模拟的敏感性, 并重点分析了微波亮温对地表和云雨参数的敏感性。结果表明, 地表参数中土壤湿度、地表温度和植被覆盖度三者对 CRTM 模拟亮温影响较大, 而模拟微波地表发射率主要受土壤湿度和植被覆盖度的影响; 有云雨存在时, 降水云比非降水云的影响大。6 种云中, 雨云对模拟的影响最大。晴空条件下, 大部分通道的正演亮温误差在 3 K 以内, 垂直极化较水平极化误差小。低频通道比高频通道受地表参数影响大, 受云雨影响小, 垂直极化比水平极化更稳定。其中 10.65 V 通道几乎不受云雨影响, 但对地表参数非常敏感。

**关键词:** 辐射传输模型, CRTM, 微波亮温, 数据同化

**中图分类号:** P405

**文献标志码:** A

**doi:** 10.7519/j.issn.1000-0526.2014.11.009

## Sensitivity of CRTM Simulated Microwave Brightness Temperature to Landsurface and Cloud Parameters

BAI Ling<sup>1</sup> SHI Chunxiang<sup>2</sup> LIU Bing<sup>3</sup> CHENG Lu<sup>1</sup> YANG Yuanhui<sup>1</sup>

1 School of Remote Sensing, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

2 National Meteorological Information Centre, Beijing 100081

3 School of Atmospheric Physics, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

**Abstract:** Using rapid radiative transfer model CRTM, the sensitivity of microwave surface emissivity microwave brightness temperature (TB) to landsurface and cloud parameters is analyzed. First, the accurate measured ground and sounding data of Yunnan Simao are used as input of CRTM to simulate 12 microwave channels' surface emissivity and TB, then the simulated TB is compared with AMSR-E satellite TB data, and, moreover, the simulation error and sensitivity to each parameter are analyzed. The results show that soil moisture, surface temperature and vegetation fraction have a great influence on TB simulation, and simulated surface emissivity is affected by soil moisture and vegetation fraction. The influence of precipitation clouds is bigger than non-precipitation clouds. Among the 6 kinds of clouds, the rain cloud has the biggest influence. In the clear sky condition, most of the 12 channels' simulation errors are between 0 to 3 Kelven. Channel 10.65 V is hardly affected by cloud and rain, but it is very sensitive to the landsurface parameters.

**Key words:** radiative transfer model, CRTM, microwave brightness temperature, data assimilation

\* 公益类行业(气象)科研专项(GYHY201306045 和 GYHY201206008)及国际科技合作与交流专项(2011DFG23150)共同资助  
2013 年 5 月 10 日收稿; 2014 年 3 月 5 日收修定稿

第一作者: 白翎, 主要从事陆面数据同化方面的研究. Email: heather-bai@163.com

通信作者: 师春香, 主要从事陆面数据同化及融合方面的研究. Email: shicx@cma.gov.cn

## 引 言

在陆面数据同化系统中直接同化卫星亮温资料,一般采用辐射传输模型作为观测算子来模拟卫星亮温。辐射传输模型作为观测算子将预报模式状态(如土壤湿度)与卫星辐射亮温联系起来,其模拟能力将直接影响同化结果,所以在同化系统中必须选用合适的辐射传输模型来描述辐射传输过程(Crow et al, 2003; Yang et al, 2007; Jia et al, 2009; 2011)。相对于可见光和红外探测资料来说,微波资料受到云的影响相对较小,尤其是低频信号对地表信息敏感,有利于同化到陆面数据同化系统中。由于观测算子在云、降水粒子及性质复杂下垫面等因素影响下模拟辐射传输过程不准确,会对微波亮温同化产生影响(杨寅等, 2011)。因此,开展微波辐射传输模型的卫星辐射亮温模拟,分析模拟对各参数的敏感性,可为建立观测资料质量控制方案和改进陆面数据同化系统提供依据,对卫星资料的直接同化具有积极意义。

国内外一些学者利用辐射传输模式模拟微波亮温,分析了模拟结果对地表和云雨参数的响应以及与观测的误差。张森等(2012)利用 VDISORT (Vector DIScrete Ordinate Transfer)模式对风云三号微波探测仪器中 50~60 GHz 和 118.75 GHz 频点,分析了模拟亮温与各种水凝物粒子之间的关系,结果表明各通道对各种水凝物粒子均很敏感;王雨等(2010)利用微波辐射传输模式 MWRT 分别模拟了不同下垫面和降水云参数条件下的 TMI (TRMM Microwave Imager)各通道微波亮温,分析了不同条件下各通道微波信号对降水云的响应特点,认为对于陆面,37 和 85 GHz 的垂直极化差对下垫面状况不很敏感;黄容等(2004)和王小兰等(2005)结合云模式和 Monte Carlo 三维微波辐射传输模式模拟了 TMI 的亮温,结果表明各微物理量对辐射亮温的影响较大;董佩明等(2009)通过中尺度数值模式 WRF 的预报输出提供水物质输入,利用 CRTM (Community Radiative Transfer Model)模式分析了水物质对云雨区在 NOAA16 AMSU A/B 各通道卫星亮温模拟计算的影响;Jia 等(2011)耦合 CMEM (Community Microwave Emission Model)和陆面模式

CLM (Community Land Model), 模拟东亚地区的 C 波段亮温,并对比 AMSR-E 观测数据进行了评估,结果表明垂直极化方向的模拟与观测亮温比水平极化方向接近;Sabater 等(2011)将陆面模式 HTESSEL (Hydrology Tiled ECMWF Scheme for Surface Exchanges over Land)与 CMEM 耦合,模拟 L 波段亮温对不同入射角和土壤粗糙度参数化方案的敏感性响应。

上述工作都是用数值模拟结果输入辐射传输模式来分析某几个参数对某些频点模拟亮温的影响,而本文将综合分析 6.925~89 GHz 的 12 个通道模拟地表发射率和亮温对地表和云参数的敏感性。利用云南思茅地区实测地面和探空数据,通过 CRTM 模式正演 12 个微波通道的地表发射率和亮温,对比 AMSR-E 卫星观测数据分析了模拟与观测亮温的差异,研究了亮温模拟对地表参数和云参数的敏感性,并可为陆面数据同化系统中微波亮温资料的质量控制方案提供参考和依据。

## 1 模式和资料介绍

CRTM (Community Radiative Transfer Model)是由 JCSDA (美国卫星资料同化联合中心)开发的,用于卫星可见光、红外、紫外或微波通道辐射传输的一个快速辐射传输模式,它是目前应用比较广泛、很具代表性的一个辐射传输模式,并已经高度模块化,实现了其研究到应用的转换。该模式是针对卫星数据同化而开发的,目标是利用其实现数值天气预报中全天候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计的一个突出特点(董佩明等, 2009),并且微波波段计算精度较高(李俊等, 2012)。CRTM 目前主要用于在多种下垫面如海洋、陆地、雪和冰上的卫星辐射观测数据的直接同化,提高数值天气预报的服务水平,美国国家环境预报中心(NCEP)也发现微波资料直接同化可以显著提高数值预报的准确性(刘君等, 2013)。目前该模式已用于中尺度天气预报模式 WRF (Weather Research and Forecasting Model)和中国气象科学研究院 GRAPES2-3DVar 数值预报与同化系统中。

CRTM 的辐射传输过程可表述为以下几个模

型: 地表发射反射模型、气溶胶吸收散射模型、云吸收散射模型、分子散射模型和气体吸收模型。其中地表发射模型针对海洋、海冰、雪、植被(裸土)、沙漠等不同的下垫面类型有相应的算法; 植被覆盖下的微波发射率模型(Weng et al, 2001)将多种地表类型的地表发射率量化, 考虑了三层介质, 顶层和底层被认为是空间均匀的, 由均一的介电常数来表示, 中间一层是空间非均匀的介质(包括雪颗粒、沙粒和植被等散射体)。用辐射传输方程计算中间层介质的体散射, 用修正的 Fresnel 方程计算上下两层介质的反射。计算地表发射率所需的地表类型信息由 NOAA 陆面模式地表类型数据库提供。云、气溶胶和分子散射模型是通过查找表来得到散射系数和相函数的。计算云和分子吸收的透过率模型有 ODAS 和 ODPS 两个, ODAS 只考虑了水汽和臭氧两种吸收气体的光学厚度, ODPS 相比 ODAS 而言还考虑了  $\text{CO}_2$  对辐射的吸收, 甚至对高光谱传感器如 IASI 等吸收气体增加到包括  $\text{N}_2\text{O}$ 、 $\text{CO}_2$  和  $\text{CH}_4$  等 6 种气体。CRTM 的透过率系数文件中还包括一些固定混合气体的吸收系数。表 1 给出本文用到的 CRTM 输入参数。

表 1 CRTM 输入变量

Table 1 Input variables of CRTM

变量种类	变量内容	单位
大气廓线	气压	hPa
	大气温度	K
	水汽含量	ppmv*
	臭氧含量	$\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$
地表参数	陆地百分比	0~1
	地表类型	
	地表温度	K
	土壤含水率	$\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$
	植被覆盖度	0~1
	土壤温度	K
云参数	云类型	
	水含量	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$
	粒子有效半径	$\mu\text{m}$
	所在气压层	

\* 1 ppmv =  $10^{-6}$ 

本文选用的云南思茅地区晴空实测探空数据包括大气温度、湿度廓线, 该数据是为风云三号卫星微波成像仪定标而专门测量的探空资料, 数据可靠, 准确性高, 试验过程中对 2008 年 9 月 8、9、12 和 13 日以及 2007 年 11 月 12、16 和 18 这 7 天的观测数据进行了模拟, 得到结果和结论类似, 所以这里只以

2008 年 9 月 9 日的模拟结果作为代表进行讨论。思茅处于低纬高原南亚热带季风气候区, 臭氧廓线采用模式自带的热带标准大气廓线, 地表覆盖类型为阔叶林, 地表温度和土壤温度由当天的实测数据给出。

## 2 模拟与观测的对比分析

利用 AMSR-E L2A 等经纬度亮温产品(空间分辨率为  $0.25^\circ$ ), 与 CRTM 模拟亮温结果进行了对比分析。由于地表数据观测时间是北京时 10:50, 为了使卫星观测时间和地表数据观测时间尽量接近, AMSR-E 数据产品选用了世界时 07:00 升轨资料。CRTM 模式输入的土壤湿度数据采用 AMSR-E 土壤湿度三级产品, 为  $0.15 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ , 思茅地区的植被类型是常绿阔叶林, 观测地点植被茂密, 植被覆盖度设为较接近真实情况的值 1.0, 地表温度为 290 K, 是与探空数据同步实测的数据。利用 CRTM 计算得到晴空条件下地表发射率和卫星亮温的模拟值。

图 1 是 CRTM 模拟 AMSR-E 的 12 个通道地表的发射率, 图 2 是 12 个通道的模拟亮温及 AMSR-E 观测亮温。需要指出的是, CRTM 模式设定当频率大于 80 GHz 时, 地表发射率取为定值 0.95。从图 1 可以看出, 6.925 GHz 的发射率约 0.93~0.96, 10.7 GHz 约 0.95~0.97, 18.7 GHz 约 0.96~0.97, 23.8 GHz 约 0.96~0.97, 36.5 GHz 约 0.97, 即各频点的发射率都较高, 都在 0.93 以上。思茅地区的植被覆盖较好, 地表发射率较高且稳定, V 极化的地表发射率要高于 H 极化, 符合物理规律。

由图 2 中对比 CRTM 模拟亮温和 AMSR-E 实测亮温可以发现, CRTM 对 V 极化的亮温模拟比 H 极化更接近实际观测值, 大部分通道的模拟和观测亮温偏差都较小, 6.925 V、10.65 V、10.65 H、18.7 V、18.7 H、23.8 V 和 23.8 H 7 个通道的偏差约在 1 K 以内, 36.5 H、36.5 V 和 89 H 在 3 K 以内, 6.925 H 和 89 V 在 5 K 以内。大致上 CRTM 模拟亮温略低于 AMSR-E 观测亮温。偏差的来源是多方面的, 一方面是 CRTM 的模拟能力, 如在 6.925 H 模拟亮温相对其他通道略大的偏差, 部分原因是模式在此通道的辐射传输描述不够准确, 另一方面是探空数据时间和 AMSR-E 观测时间不匹

配, AMSR-E 在思茅的过境时间是北京时 15:00, 而 CRTM 模拟的时间是北京时 10:50, 两者相差约 4 h, 地表状态和大气状态都发生了变化, 尤其是地表温度, 这也是造成模拟亮温偏低的一个重要原因。此外, 偏差还会由 AMSR-E 仪器本身造成, 以及观测与模拟像素大小不一致等原因造成。

另外, CRTM 模拟亮温与 AMSR-E 观测亮温在 36.5 GHz 后的趋势不一致, 观测亮温在 23.8~36.5 GHz 有略微下降, 然后在 89 GHz 又上升, 而模拟则没有表现出这种趋势。试验进一步用同一天思茅地区的 FY3/MWRI 数据对比发现, AMSR-E 和 FY3/MWRI 亮温分布变化趋势一致, 即 36.5 GHz 明显下滑。这说明此处模拟和观测的趋势不一致的原因应该是 CRTM 在该频率处模拟能力不足, 没有很好地考虑此频率大气吸收, 高估了亮温。

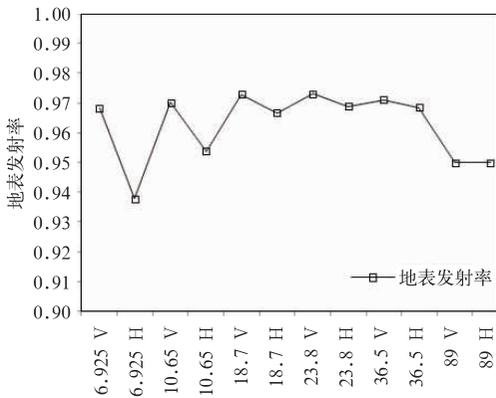


图 1 CRTM 模拟的地表发射率

Fig. 1 Simulated surface emissivity of CRTM

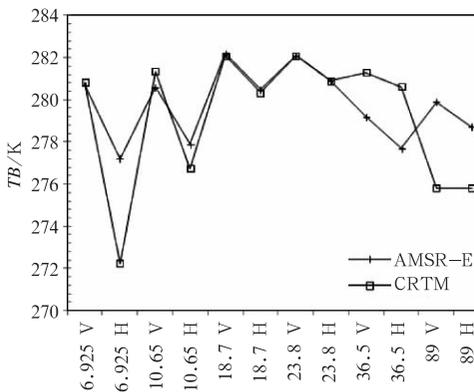


图 2 CRTM 模拟亮温与 AMSR-E 观测亮温的对比

Fig. 2 Comparison of simulated brightness temperature and AMSR-E observation

### 3 地表参数敏感性分析

试验表明, CRTM 模拟微波地表发射率受土壤湿度和植被覆盖度两个参数的影响很大。图 3a~3c 分别是不同土壤湿度、植被覆盖度和地表温度下 CRTM 模拟的地表发射率, 图中 sm 代表土壤湿度 (soil moisture), VF 代表植被覆盖度 (vegetation fraction), LT 代表地表温度 (Land temperature)。可以看出, 对地表发射率而言, 基本上只受土壤湿度和植被覆盖度的影响而变化, 地表温度对其基本无影响。随着土壤湿度增大, 土壤表面变湿会导致发射率迅速下降, 低频通道比高频通道更敏感。植被覆盖度越大, 植被覆盖越好, 发射率越高, 反之越低。原因是植被的微波发射率要高于裸土的微波发射率, 随着植被密度的增大, 裸土的贡献减小, 导致总

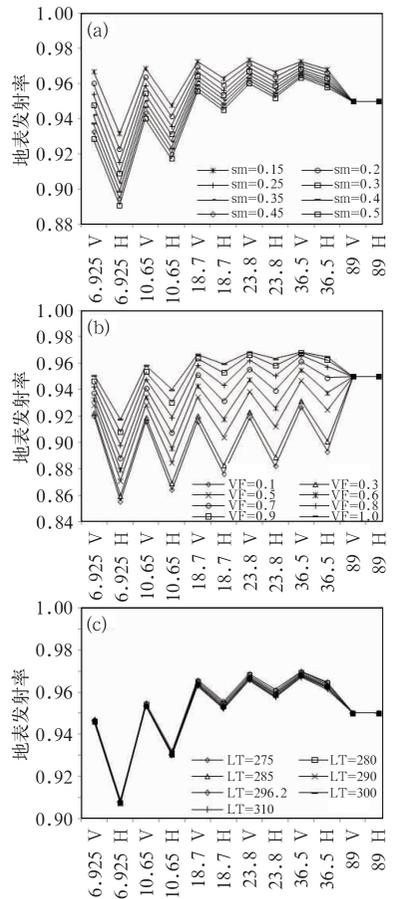


图 3 CRTM 模拟不同土壤湿度(a)、植被覆盖度(b)和地表温度(c)下的各通道地表发射率

Fig. 3 Simulated surface emissivity of 12 channels in different conditions of soil moisture (a), vegetation fraction (b) and surface temperature (c)

体发射率的增大。另外,植被吸收与衰减等辐射特征主要取决于植被的介电性质、密度、植被组分大小,随着植被覆盖度的增大会增加 H 极化的发射率,减小极化差(V-H)。在总体趋势上,除89 GHz 之外,其余 10 个通道都表现出随频率增大微波辐射率增大的趋势,并且水平和垂直极化方向的亮温差(V-H)在低频较大,在高频较小。这是因为随着频率升高,植被体散射作用增强,植被辐射增强,造成总辐射随频率升高而增强,同时体散射作用会减小频率间的极化差。张勇攀等(2010)研究也指出,对于植被覆盖度很高的阔叶林,发射率总体趋势是随频率增加而增大,极化差随频率增大而急剧减小。

CRTM 模拟亮温受土壤湿度、植被覆盖度和地表温度 3 个地表参数的影响都很大。地表温度一定时,模拟亮温由地表发射率决定,表现出与地表发射率一致的趋势,如图 4 所示,图 4a 和 4b 分别为不同

土壤湿度和植被覆盖度情况下的 CRTM 模拟亮温。土壤湿度越小,植被覆盖度越大,随着地表发射率的增大,亮温也越高,反之越低。地表温度的变化直接影响卫星接受到的亮温,对亮温模拟的影响也较大,如图 4c,地表温度越高,亮温越高,反之越低。

### 4 云参数敏感性分析

与可见光和红外辐射不同,微波辐射一方面能穿透云雨大气,另一方面云雨大气也会通过吸收、发射和散射作用对微波辐射的传输产生影响。大气中对微波的主要吸收气体是水汽和氧气。云雨大气对微波的吸收、发射和散射作用与大气的热力结构和微物理特性有关(游然,2010)。当前 CRTM 处理的云和降水类型包括水云、雨云、冰云、雪云、霰云和雹云。下面按每种云类型,分别做了 AMSR-E 各频点亮温对云雨大气的敏感性分析。试验中每种云的粒子有效半径、水含量、云顶高和云底高均根据不同云类型,设置了不同的参数。

#### 4.1 水云

这里分析粒子有效半径、水含量某一个因子时,都将另外一个因子设为合理的定值。水云的粒子有效半径和水含量的合理定值分别设为  $10 \mu\text{m}$  和  $0.3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ ,例如分析有效半径从  $5 \sim 15 \mu\text{m}$  变化时,水云的水含量设为  $0.3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ ;分析水含量从  $0.2 \sim 0.4 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$  时,水云粒子的有效半径设为  $10 \mu\text{m}$ 。水云所处气压层为  $625 \sim 725 \text{ hPa}$ ,相当于高度在  $3 \sim 4 \text{ km}$  的层积云。

图 5 给出了粒子有效半径和水含量变化时模拟微波亮温的情况。对比晴空条件下模拟亮温可以看出,水云对模拟微波亮温的影响主要是增温效果,当水含量很大时,对高频有减温效果,对模拟亮温的影响约在  $2 \text{ K}$  以内。按照辐射定律,大气在某波段的吸收越强,辐射也越强,因此在吸收带有较强的大气辐射,云滴的吸收发射作用更强使得亮温增加,  $18.7$ 、 $23.8$ 、 $36.5$  和  $89 \text{ GHz}$  比低频  $6.925$  和  $10.65 \text{ GHz}$  水汽吸收更强,因此受云中液态水的影响更大。云的吸收系数只取决于它们的水含量,而与其云滴的大小分布无关,所以改变有效半径对微波亮温没有影响。随着水云中水含量的增大,  $6.925$ 、 $10.65$ 、 $18.7$  和  $23.8 \text{ GHz}$  处由于吸收作用亮温升高,而到了  $36.5 \text{ GHz}$ ,云滴在高频的散射作用加强,

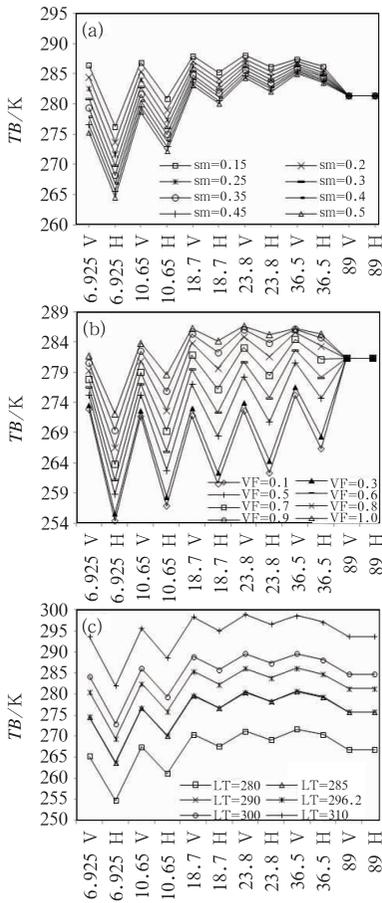


图 4 CRTM 模拟不同土壤湿度(a)、植被覆盖度(b)和地表温度(c)下的各通道亮温(TB,单位:K)

Fig. 4 Simulated brightness temperature (TB, unit: K) of 12 channels in different conditions of soil moisture (a), vegetation fraction (b) and surface temperature (c)

明显于吸收作用,又使得亮温降低。当水含量增大到  $0.4 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$  以后,  $36.5 \text{ V}$  和  $89 \text{ V}$ 、 $89 \text{ H}$  处的亮温都低于晴空条件下。 $\text{V}$  极化相比  $\text{H}$  极化受影响小。

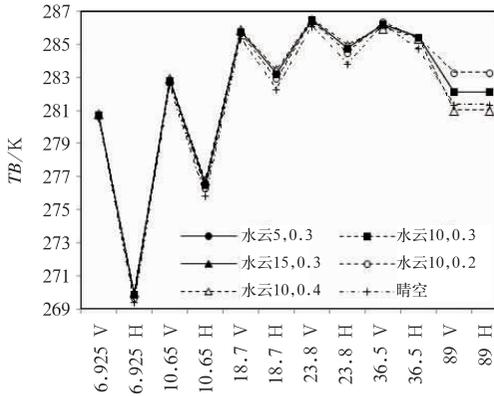


图 5 改变水云粒子有效半径、水含量的模拟亮温

(实心标记表示有效半径分别取  $5$ 、 $10$ 、 $15 \mu\text{m}$  时的亮温,虚线表示水含量从  $0.2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$  变化到  $0.4 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$  的亮温,十字标记虚线表示模拟的晴空亮温)

Fig. 5 Simulated brightness temperature by changing effective particle radius and water content of water cloud

(The solid mark represents brightness temperature when the effective radius are  $5$ ,  $10$ ,  $15 \mu\text{m}$ . Dotted lines indicate brightness temperature when the water content changing from  $0.2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$  to  $0.4 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ , dotted line with cross marks stands for simulated brightness temperature of clear sky)

## 4.2 雨云

设置雨云的粒子有效半径为  $10 \mu\text{m}$ ,水含量为  $0.3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ ,所在气压层为  $475 \sim 725 \text{ hPa}$ ,相当于高度在  $3 \sim 6 \text{ km}$  的雨层云。从图 6 可以看出,雨云对低频  $6.925$  和  $10.65 \text{ GHz}$  起增温效果,对高频起减温效果。这是由于微波低频区液态水的发射作用要大于散射作用,雨滴的发射作用显现,使得亮温迅速升高。而到了高频区,微波波长减小,雨滴粒子的大小更接近波长,散射作用大于吸收作用,使得亮温降低。雨滴有效半径越大,在高频的散射作用越强,亮温越低,在  $6.925$  和  $10.65 \text{ GHz}$  的低频,由于波长远大于粒子的尺度,散射作用不明显,有效半径的变化基本没有影响。水含量越大,低频增温、高频减温的幅度越大。当水含量增加到  $1.5 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$  时,  $89 \text{ GHz}$  的模拟亮温变化很小。水含量的增大,使

得在低频的吸收再发射作用增强,亮温增加;在高频的散射作用大于吸收作用,亮温迅速降低。除了通道  $10.65 \text{ V}$  基本不受影响,雨云对其他通道模拟亮温的影响都比较大。比如模拟高度在  $3 \sim 6 \text{ km}$  的雨层云时,对亮温的影响最大可以达到  $19 \text{ K}$  左右。

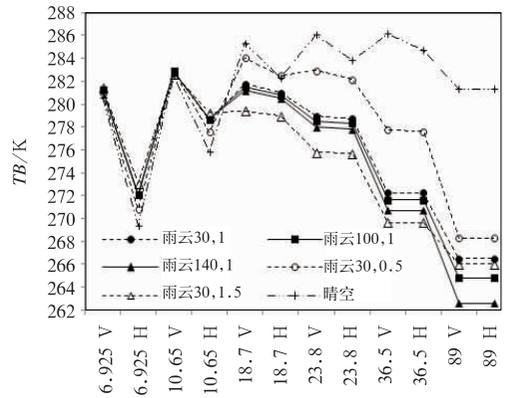


图 6 改变雨云粒子有效半径、水含量的模拟亮温

Fig. 6 Simulated brightness temperature by changing effective particle radius and water content of rain cloud

## 4.3 冰云

冰云的定值分别设为粒子有效半径  $100 \mu\text{m}$ ,水含量  $0.2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ ,所在气压层为  $275 \sim 325 \text{ hPa}$ ,例如高度在  $9 \sim 10 \text{ km}$  的卷云。冰云的吸收系数是水云吸收系数的几分之一,基本上不吸收微波辐射,而只能散射辐射,所以对所有通道模拟亮温的影响都是减温作用。冰粒子的散射取决于它们的粒子尺度相对于微波频率的大小,由于冰粒子的半径相对于微波波长很小,这种减温作用很微弱,量级只有  $10^{-2}$  左右。冰云粒子有效半径和水含量的变化无论在高频还是低频对模拟亮温基本上都没有影响,如图 7 所示。

## 4.4 雪、霰、雹云

雪云这里假定为高度在  $3 \sim 6 \text{ km}$  的雨层云,粒子有效半径设为  $200 \mu\text{m}$ ,水含量  $0.2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ ,气压层为  $475 \sim 725 \text{ hPa}$ 。霰云的设定值分别为粒子有效半径  $100 \mu\text{m}$ 、水含量  $0.2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ ,雹云的设定值分别为粒子有效半径  $200 \mu\text{m}$ 、水含量  $0.1 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ ,气压层与雪云相等。通过图 8 可以看出,雪、霰、雹云三者对模拟微波亮温的影响类似。

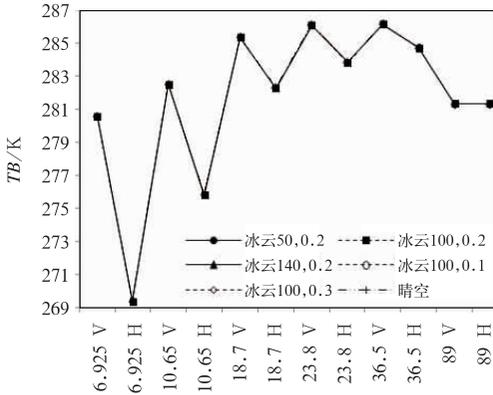


图 7 改变冰云粒子有效半径、水含量的模拟亮温

Fig. 7 Simulated brightness temperature by changing effective particle radius and water content of ice cloud

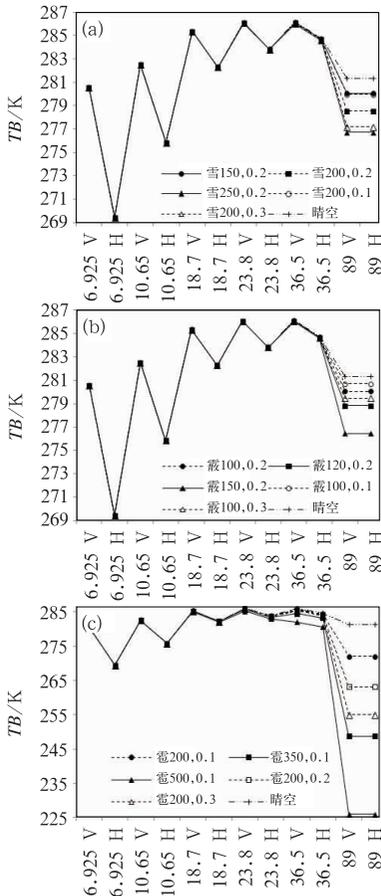


图 8 改变雪云(a)、霰云(b)和雹云(c)粒子有效半径、水含量的模拟亮温

Fig. 8 Simulated brightness temperature by changing effective particle radius and water content of snow cloud (a), graupel cloud (b) and hail cloud (c)

雪云对低频亮温的影响很小,到 89 GHz 时才有明显的影响,当水含量为  $0.2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ ,粒子有效半径为  $250 \mu\text{m}$  时模拟的亮温比晴空时约低 5 K。雪云粒子尺度相对于低频波长比较小,散射作用没有体现,且雪的水含量相对雨云很低,吸收作用也很小,没有明显的减温或增温。当频率为 89 GHz 时,散射作用才体现出来。随着有效半径的增大,粒子在高频的散射作用增强;水含量越大,散射作用越强,亮温迅速降低。

霰云与雪云情况基本一致,只有在 89 GHz 处才对亮温有较大影响。当粒子有效半径为  $150 \mu\text{m}$ ,水含量为  $0.2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$  时,模拟亮温比晴空时约低 5 K。亮温与粒子有效半径和水含量都成反比关系。

雹云由于粒子半径比雪云和霰云大,在高频处散射更强,亮温降低的更明显。在 36.5 GHz 处最大有 4 K 的降温,在 89 GHz 处的影响最大,当粒子有效半径增大到  $300 \sim 500 \mu\text{m}$  时,降温可以达到几十 K,当有效半径设为  $500 \mu\text{m}$ ,水含量为  $0.1 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$  这种极端情况时,模拟亮温的下降幅度能达到 55 K,见图 8c。

表 2 给出了本文中每种云类型粒子有效半径和水含量的试验取值,以及对各通道模拟亮温的影响最大绝对值。分析 12 个通道受影响的情况,可以得到云对模拟卫星微波亮温的影响有以下特征:降水云比非降水云对模拟的影响大。总体上说,低频比高频所受云雨影响小,V 极化比 H 极化所受影响小。其中 6.925 GHz 基本只受雨云的影响,其他云类型的影响极小可以忽略;10.65 V 是受云雨影响最小的通道,亮温变化均在 0.5 K 以内,对地表的探测基本没有影响;10.65 H、18.7 GHz 3 个通道亮温受影响主要来自雨云,其次是水云,其他 4 种类型的云影响可忽略;23.8 和 36.5 GHz 主要受雨云和雹云影响;89 GHz 除了对冰云不敏感外,受其他 5 种云影响都较大,尤其受雹云影响最大可达几十 K。

从以上分析可以看出,10.65 V 通道基本不受云雨的影响,模拟地表微波亮温时与晴空差距最小,可以清楚感知下垫面的微波信号,且对地表参数很敏感,有利于同化到陆面数据同化系统中。

### 5 结 论

利用快速辐射传输模式 CRTM 和云南思茅地

表 2 6 种云的粒子有效半径、水含量试验取值以及对 12 个通道模拟亮温影响最大绝对值(TB, 单位: K)  
Table 2 Experimental values of the effective particle radius and the water content of 6 kinds of clouds, and the maximum absolute value (TB, unit: K) of each channel impacted by the cloud

	有效半径 / $\mu\text{m}$	水含量 / $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$	6.925 V	6.925 H	10.65 V	10.65 H	18.7 V	18.7 H	23.8 V	23.8 H	36.5 V	36.5 H	89 GHz
水云	5、10、 15	0.2、0.3、 0.4	0.5	0.5	0.5	1.5	1	1.5	0.5	2	1	1	2
雨云	30、100、 140	0.5、1.0、 1.5	1	4	0.5	4	4	4	10	8	17	15	19
冰云	50、100、 140	0.1、0.2、 0.3	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
雪云	150、200、 250	0.1、0.2、 0.3	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.2	5
霰云	100、120、 150	0.1、0.2、 0.3	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	5
雹云	200、350、 500	0.1、0.2、 0.3	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	1	1	4	4	55

区的实测地面及探空数据,正演了 12 个微波通道的地表发射率和亮温,并通过与 AMSR-E 卫星观测数据的对比,分析了亮温模拟误差。重点针对 CRTM 的亮温模拟对地表参数和云参数的敏感性问题进行了分析,得到以下结论:

(1) 云南思茅地区的植被覆盖较好,各频点的发射率都较高,均在 0.93 以上,V 极化的地表发射率要高于 H 极化。从 CRTM 模拟亮温与 AMSR-E 观测亮温对比分析得出,总体看来 V 极化通道的模拟更接近 AMSR-E 观测数据,并且 V 极化通道亮温要高于 H 极化通道亮温。绝大多数通道的模拟和观测亮温偏差都较小,如 6.925 V、10.65 V、10.65 H、18.7 V、18.7 H、23.8 V 和 23.8 H 7 个通道的 CRTM 模拟亮温和卫星通道亮温偏差约在 1 K 以内,36.5 H、36.5 V 和 89 H 的偏差在 3 K 以内,6.925 H 和 89 V 的偏差在 5 K 以内。

(2) CRTM 模拟的 6.925~36.5 GHz 的垂直和水平极化通道的地表发射率主要受土壤湿度和植被覆盖度的影响。土壤湿度越大,地表发射率越小,反之地表发射率越大;植被覆盖度越大,地表发射率越大,反之地表发射率越小。

CRTM 模拟的通道亮温受土壤湿度、植被覆盖度和地表温度三者的影响都很大。土壤湿度越大,亮温越低,反之亮温越高;植被覆盖度越大,地表发射率越大,亮温越高,反之越低;地表温度越高,模拟的卫星接收到亮温也越高。

CRTM 模拟地表发射率和卫星通道亮温在低频通道比高频通道对地表参数更敏感,水平极化通

道比垂直极化通道对地表参数更敏感,极化差随频率的增大而减小。

(3) 云对微波的吸收和散射作用比晴空大气强得多,设定一定的粒子有效半径和水含量范围进行试验,发现云对 12 个微波通道亮温的影响有以下特征:低频通道受云雨的影响比高频小,V 极化比 H 极化受影响小;降水云比非降水云对模拟的影响大,其中影响最大的云类型是雨云,水云的影响在 2 K 以内,冰云对模拟几乎没有影响,雪、霰、雹云主要对 36.5 GHz 以上的高频有较大影响,对低频影响很小。

(4) 受云雨大气影响最小的通道是 10.65 V,亮温变化在 0.5 K 以内,模拟晴空地表微波亮温与 AMSR-E 观测亮温差小于 0.5 K,且对地表参数非常敏感,可以清楚感知下垫面的微波信号,有利于同化到陆面数据同化系统中。

## 参考文献

- 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.
- 黄容,程明虎,崔哲虎,等.2004.用云和辐射传输模式研究对流性降水云微物理及辐射特性.气象,30(3):7-11.
- 李俊,方宗义.2012.卫星气象的发展——机遇与挑战.气象,38(2):129-146.
- 刘君,黄江平,董佩明,等.2013.卫星资料循环同化应用对区域数值预报效果影响分析.气象,39(2):156-165.
- 王小兰,程明虎,崔哲虎.2005.对流性降水云辐射特性研究.气象,31(9):3-7.
- 王雨,傅云飞.2010.微波成像仪通道对降水云参数响应的数值模拟

- 研究. 气象学报, 68(3): 315-324.
- 杨寅, 韩威, 董佩明. 2011. AMSU 微波探测资料同化的质量控制方法概述. 气象, 37(17): 1395-1401.
- 游然. 2010. 星载微波遥感降水的若干问题研究. 南京: 南京信息工程大学博士学位论文, 1-125.
- 张森, 卢乃锰, 谷松岩, 等. 2012. 风云三号(02)批卫星微波氧气吸收通道降水特性. 应用气象学报, 23(2): 223-230.
- 张勇攀, 蒋玲梅, 邱玉宝, 等. 2010. 不同地物类型微波发射率特征分析. 光谱学与光谱分析, 30(6): 446-451.
- Crow W. T., Wood E. F. 2003. The assimilation of remotely sensed soil brightness temperature imagery into a land surface model using ensemble Kalman filtering: A case study based on ESTAR measurements during SGP97. *Adv Water Resou*, 26(2): 137-149.
- Jia Binghao, Xie Zhenghui, Tian Xiangjun et al. 2009. A soil moisture assimilation scheme based on the ensemble Kalman filter using microwave brightness temperature. *Sci China (Earth Sciences)*, 52(11): 1835-1848.
- Jia Binghao, Xie Zhenghui. 2011. Evaluation of the community microwave emission model coupled with the community land model over East Asia. *Atmos Ocea Sci Lett*, 4(4): 209-215.
- Sabater J M, Rosnay P DE, Balsamo G. 2011. Sensitivity of L-band NWP forward modelling to soil roughness. *Int J Remote Sensing*, 32(19): 5607-5620.
- Weng Fuzhong, Yan Banghua, Grody N. C. 2001. A microwave land emissivity model. *J Geophys Res*, 106(D17): 20115-20123.
- Yang K, Watanabe T, Koike T, et al. 2007. Auto-calibration system developed to assimilate AMSR-E data into a land surface model for estimating soil moisture and the surface energy budget. *J Meteor Soc Japan*, 85A(0): 229-242.