

应用 AMSU-B 微波资料识别强对流云区的研究

方 翔^{1,2} 邱 红² 曹志强² 王 新¹ 洪 刚¹

(1. 北京大学物理学院大气科学系, 北京, 100871;

2. 中国气象局中国遥感卫星辐射测量和定标重点开放实验室 国家卫星气象中心)

提 要: 微波遥感可以穿透云顶直接探测对流云内的冰态粒子分布, 受冰晶粒子的强烈散射衰减作用, AMSU-B 的 3 个微波水汽吸收波段亮温随冰粒子的增加而降低。由于探测权重高度不同, 辐射传输过程中受冰粒子的散射影响也不尽相同, 3 个水汽通道之间存在亮温差异, 这种差异与对流云的强弱密切相关。

利用微波向量辐射传输模式(VDISORT)模拟了云雨粒子对微波水汽通道观测的影响, 并利用 2005 年 8 月 12 日华北地区的对流天气过程, 分析了 AMSU-B 通道亮温与对流强弱变化之间的对应关系。在此基础上, 建立了一种利用 NOAA 卫星 AMSU-B 水汽通道亮温差定量判识深对流云和冲顶对流云的方法。利用该方法对典型对流降水云团进行判识, 结果显示, 微波识别的对流云区可以较好地表征强降水的分布, 其中的冲顶对流区与可见光云系的上冲云顶结构有着很好的对应。

关键词: 气象卫星 对流 微波 水汽通道

Research on Severe Convective Cloud Identification by Using AMSU-B Microwave Data

Fang Xiang^{1,2} Qiu Hong² Cao Zhiqiang² Wang Xin¹ Hong Gang¹

(1. Atmospheric Department of Peking University, Beijing 100871;

2. Key Laboratory of Radiometric Calibration and Validation for Environmental Satellites,
China Meteorological Administration, National Satellite Meteorological Center)

Abstract: Microwave remote sensing has a unique ability to penetrate the clouds and get the distribution of ice. The brightness temperatures of the AMSU-B three channels near to the water vapor absorption line have high sensitivity to frozen hydrometeors in convective cloud systems. As the ice contents ascend, the brightness temperatures descend due to the ice scattering attenuation.

基金项目: 国家高技术研究发展计划“多源卫星资料强对流监测与追踪方法研究(2006AA12Z106)

国家基础研究项目基金“我国南方致洪暴雨监测与预测的理论和方法研究”(2004CB418305)资助

收稿日期: 2007 年 11 月 29 日; 修定稿日期: 2008 年 1 月 24 日

Especially, the brightness temperature differences between the three channels are suggested as a criterion to detect the deep convective clouds.

Based on the simulation of the influence of the water vapor, cloud and precipitation particles on the three microwave brightness temperatures, and by analyzing the convective synoptic process occurred on 12 August 2005, the relationship between the brightness temperatures and the convective intensity is studied. Furthermore, a measurable method is developed to estimate and identify the deep convective clouds and convective overshooting. This method is employed to investigate some typical convective systems. The results show that the convective cloud identified by AMSU-B data well corresponds to the precipitation area, and even the convective overshooting region corresponds to the overshooting clouds structure.

Key Words: meteorological satellite convection microwave water vapor channel

引言

暴雨和强对流天气系统是造成中国大陆气象灾害的重要组成部分。对它们的监测也是当前卫星监测的重点。研究表明,对流云云顶高度超过 10km,被称为深对流,如果云顶高度超过 14km,被称为上冲云顶。深对流云占热带辐合带云总量的 40%~45%,它们将热量和水汽从对流层低层输送到上层,在全球气候系统中扮演着主要角色。热带对流层顶(距地面大约 14~18km 高度)是对流层和平流层之间的重要传输层,其中的深对流云是大气成分交换的主要影响因子,并进而影响到对流层顶和平流层的物理和化学过程。深对流同时又是剧烈降水产生的重要载体,深对流区往往对应着剧烈的雷雨大风和冰雹。

监测对流云首先要确定它的位置和发展高度,由于对流往往最初发生在海洋和山区等测站稀少地区,包括可见光、红外、微波、主动雷达在内的多种卫星资料成为深对流研究的主要手段。目前,红外资料探测深对流主要采用云顶亮温阈值法,如刘峰等利用 FY2C 红外云顶亮温资料阈值分析了华南典型的 MCC 演变过程^[1]。但各方法所给出的

亮温阈值各不相同,因此很难准确识别深对流的范围以及区分深对流云和薄卷云。可见光波段虽然可以识别对流形态结构,但通道特性局限,它和红外波段一样,只能测暴雨和强对流云团的云顶特征。TRMM 卫星的测雨雷达(PR)可以提供大尺度的深对流云三维结构,但 PR 的探测宽度比较狭窄且全球观测时效较长,很难对短生命史对流系统及时观测。NOAA 系列卫星上搭载的 AMSU-B 微波探测器可以提供宽幅宽(大约 2200km)、多频率(89~190 GHz)的微波观测,更为重要的是微波具有穿透云雨大气的独特能力(尽管厚云和强降水云对于 AMSU-B 不完全透明),可以揭示云团内部的结构特征,为强对流的准确识别提供帮助。

通过对 Nimbus-7 卫星 SMMR (Scanning Multichannel Microwave Radiometer) 的辐射观测信息分析,Spencer 等发现产生降水的云的微波亮温较其它云为低,且每一个极低亮温个例都与大暴雨相联系。大降水常常与大量的冰粒子有关,冰粒子散射了冰下雨滴发出的微波辐射,因此空中所测量的微波亮温随降雨率成比例降低。根据这个事实,Spencer 等利用 SMMR 数据测量陆地降水率,最大可到 $90\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$ ^[2]。王小兰等将 MM5 模式与三维辐射传输模式结合,对中

尺度降水过程中对流性降水云的微波辐射特性进行了模拟,结果也表明,云中各物理量的含量和分布对上行微波辐射亮温有重要影响^[3]。通过利用飞机在深、强的大气对流云带上飞行,Adler 等对 18~183GHz 的飞行数据进行了研究,发现,37GHz 和 18GHz 上的低微波亮温值所对应的深对流核显示了雷暴中层冰的重要性,甚至在相对低的微波波段,它们也显著地影响了向上辐射。通过将地基微波观测与地基雷达观测及可见光红外观测进行对比,同样证明了利用高频微波波段探测深对流砧下对流核的可能性^[4]。

为了更好地理解微波辐射与大气属性(包括云结构和雨强)的关系,根据地基雷达测得的水汽廓线,Yeh 等利用微波辐射传输模式模拟了不同频率(18~183GHz)向上辐射亮温。模拟结果显示,冰水的混合属性,包括相态、形态和尺度分布对高低频亮温的变化都非常重要,在 92 和 181GHz 波段的向上辐射亮温对风暴上部的云结构非常敏感^[5]。Muller 等利用辐射模拟来确定在典型中纬度大气下的水汽、非降水云液态水和冰粒子对水汽响应通道亮温的影响。研究发现,在 157 和 183GHz 波段受冰云的影响非常强,而且高云的作用强于低云^[6],因此可以利用微波水汽通道探测对流云的特征。

本文利用微波向量辐射传输模式(VDI-SORT)模拟了云雨粒子对微波水汽通道观测的影响,并利用 2005 年 8 月 12 日华北地区的对流天气过程,分析了 AMSU-B 通道亮温与对流强弱变化之间的对应关系。在此基础上,建立了一种利用 NOAA 卫星 AMSU-B 水汽通道亮温差定量判识深对流云和冲顶对流云的方法,并利用可见光云图和降水资料对判识结果进行了检验。

1 NOAA 卫星 AMSU-B 仪器特性

先进的微波探测器(AMSU)是搭载在新一代 NOAA 极轨气象卫星上的仪器,第一代 AMSU 仪器于 1998 年 5 月 13 日随 NOAA-15 卫星发射升空。AMSU 包括两部分:AMSU-A 主要用于探测大气温度分布,并可获得整层大气中各种形式的水的信息,由 15 个通道组成;AMSU-B 主要用于大气湿度分布,有 5 个通道。

表 1 给出了 AMSU-B 的光谱特征,其中,89 和 150GHz 通道位于大气窗区,通道 3~5 位于 183.31GHz 吸收线上,探测大气不同高度的辐射(图 1),反演大气中的水汽垂直分布。

表 1 AMSU-B 光谱特征

通道序号	中心频率/GHz	主要吸收成分	主要探测目的	权重函数的峰值高度	等效噪声/K	极化特性 *
1	89.0	H ₂ O	地表特征、可降水等	地表		V
2	150.0	H ₂ O	地表特征、可降水等	地表	0.68	V
3	183.31±1.0	H ₂ O	大气水汽	400hPa	0.57	
4	183.31±3.0	H ₂ O	大气水汽	600hPa	0.35	
5	183.31±7.0	H ₂ O	大气水汽	850hPa	0.30	V

2 云雨粒子对 AMSU-B 观测影响分析

对流云是由不同种类的液态粒子构成的,这些粒子包括云冰、云液态水、雨水、雪和

霰等,不同的粒子对 AMSU-B 的观测有着不同的影响。大气中的水汽、氧气以及液态水滴对于微波辐射表现为吸收作用,在局地热平衡状态下大气的发射辐射使 AMSU 观测亮温增加,大于 0.5mm 的雨滴的散射作用在

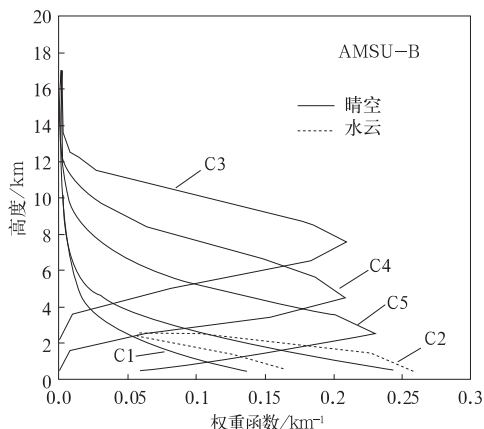


图1 AMSU-B通道的权重函数^[7]

10~300GHz 频段超过了吸收作用,使观测的亮温降低;冰晶粒子在微波各个频段的散射作用超过吸收作用,使卫星观测辐射减少。为了更好地了解云雨粒子对 AMSU 观测特别是水汽通道观测的影响,本文用 Weng^[8]利用离散纵标方法开发的向量形式的辐射传输模式(VDISORT)模拟了云雨粒子对微波水汽通道观测的影响(图2)。

图2a、b分别给出了 AMSU-B 水汽通道亮温随雨水和云水含量增加的变化情况,雨水和云水的吸收作用使水汽吸收通道亮温有所降低,但下降幅度不大,云水的影响大于雨水的影响。由于雨水和云水主要存在于对流层的中下部,因此亮温的下降主要出现在权重高度较低的 183.3±7GHz 通道,而权重高度较高的其它两个通道亮温变化不大。

云冰通常指的是大气上层水汽含量较低时形成的卷云,因为冰晶吸收较弱,以散射作用为主,云冰粒子尺度较小,对于 AMSU 探测微波辐射频段,云冰几乎完全透明,这里不作分析。

雪团和霰粒子是指降水云中的冰态粒子,特别是在对流过程中,剧烈的上升运动使云顶高度更高,生成的冰态粒子数量更多,尺度更大。对于强对流过程,伴随着上升运动

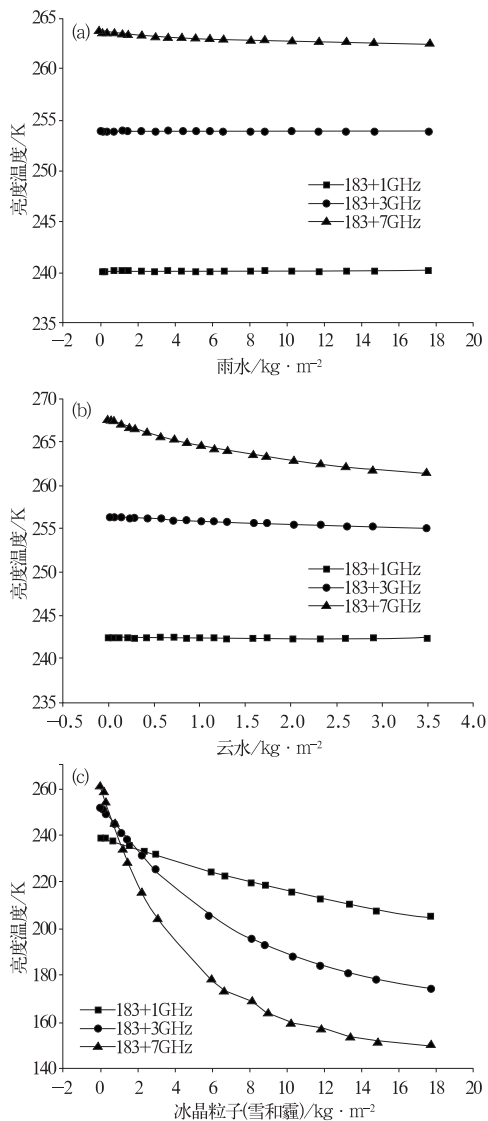


图2 雨水(a)、云水(b)、冰晶(c)粒子对于 AMSU 水汽通道观测的影响模拟

生成大量的雪团及霰粒子。由于这两种粒子尺度较大,对于地表及大气的微波辐射具有较强的散射作用,使观测亮温明显降低。图2c是在大气可降水为 68.45mm,云水为 $0.5624\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$,雨水为 $7.17\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$,云冰为 $0.1512\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 情况下,AMSU 水汽通道观测随云中雪团和霰粒子含量的变化情况。可以看出,对于水汽通道,大尺度的冰态粒子

的散射使观测亮温降低,随着冰态粒子含量增加,观测亮温迅速降低,当含量继续增加,亮温降低缓慢。

综上所述,对于 AMSU 探测水汽吸收频段的微波辐射,云水及雨水主要表现为吸收作用,使权重高度较低的水汽吸收通道亮温降低;云冰由于粒子尺度小,对微波辐射几乎没有影响;雪团和霰粒子表现为散射作用,使卫星观测的亮温降低。

3 对流云团的微波识别方法

对流系统发展旺盛时,上升运动很强,将海面及低层大气中的水汽输送到对流层中上部,经过凝结及冻结过程,形成冰粒子,上升愈强,冰粒子含量愈高。深厚的对流结构必然伴随着浓度较高的冰粒子。AMSU-B 各通道的微波辐射受云雨大气影响明显,特别是 183.3GHz 附近的微波水汽通道,冰粒子的散射作用要强于云中液态水对微波辐射的吸收作用,这些通道对冰水含量的变化比液态水更为敏感^[7]。

微波湿度计的 183.3GHz 频点处 3 个通道权函数峰值高度位置不同,其中 $183.3 \pm 7\text{GHz}$ 通道特征层高度最低, $183.3 \pm 1\text{GHz}$ 通道特征层高度最高,对深对流而言, $183.3 \pm 7\text{GHz}$ 通道能穿透对流云上部的冰晶层,到达其下部的液态水成物区域;而 $183.3 \pm 1\text{GHz}$ 通道只能探测到对流层上部的冰晶层。各通道对冰物质不同的敏感性,为利用多通道组合反演对流云带来可能。

3.1 微波对流判定依据

为了解深对流云对 AMSU-B 微波亮温的影响,本文选择 2005 年 8 月 12 日 06:14 (GMT) 的卫星资料进行分析(图 3,见彩页)。由图中可以看出,当时,在华北北部至东北南部一带有一强对流系统存在,其上有

多个对流云团发展。分别选取对流云区(黑框区)、卷云区(红框区),中低云区(紫框区)和晴空区(蓝框区)进行分析。

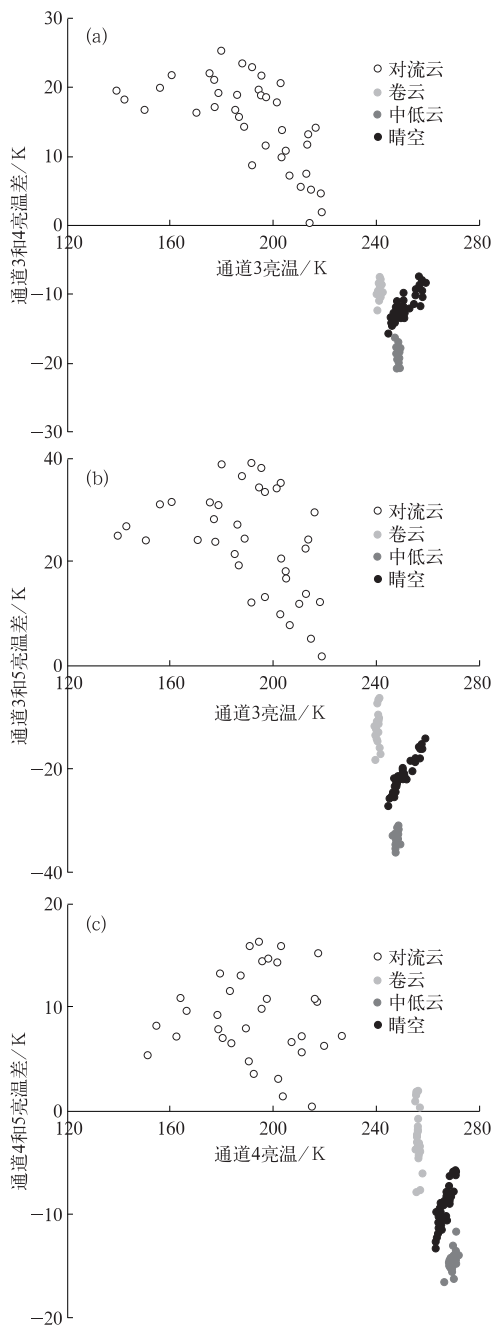


图 4 2005 年 8 月 12 日 06:14 AMSU-B 水汽单通道亮温与通道亮温差的散点图
(a) CH3 vs CH3-CH4 (b) CH3 vs CH3-CH5
(c) CH4 vs CH4-CH5

图4分别给出了不同云型及晴空的AMSU-B水汽单通道亮温和通道亮温差的散点示意图,其中亮温差是由权重函数高的通道减去权重函数低的通道。由图4可以看出:水汽单通道亮温值分布由对流云区、卷云、中低云、晴空依次递增;在通道亮温差分布上,对流云的3组亮温差全部为正,而其它几个目标区亮温差大都位于负值区,这种分布规律为深对流的判识提供了可能。

为了更好地了解亮温变化,选取穿过对流云区的一条扫描线资料进行微波亮温分析(图3中红线位置)。图5是扫描线上的5通道亮温分布,可以看出,扫描线进入对流区后,各通道亮温出现了明显下降。图中有两个亮温下降区,分别对应AVHRR云图中的两个对流云团。随着亮温的下降,各通道亮温值也在逐渐接近,云砧中的冰粒子尺度小于对流核,大粒子散射的增加导致了亮温权重函数的接近。微波通道的亮温下降,可以作为对流强度和强降水产生的判据之一。但如何准确定义判定阈值,是需要解决的问题。

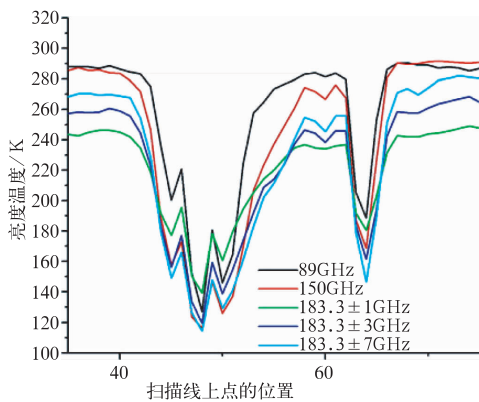


图5 NOAA-16 AMSU-B探测器5通道亮温分布图

进一步分析通道亮温的变化发现,在进入对流云区后,3个水汽通道的亮温分布出现了更为明显的变化(图6),在非对流云区,3个水汽通道的亮温变化不大,亮温值高于240K,且 $T_b(183.3 \pm 1) < T_b(183.3 \pm 3) <$

$T_b(183.3 \pm 7)$,这主要由于3个水汽通道具有不同的权重高度,离水汽吸收中心越远,其探测深度越大,即高度越低。在非对流云区,它所探测的温度就越高。

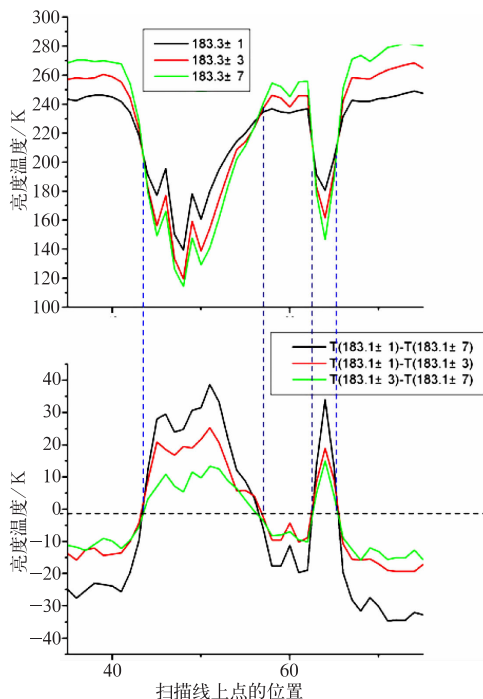


图6 NOAA-16 AMSU-B探测器水汽通道亮温分布图

进入云区后,3个通道的水汽亮温都出现了下降,下降幅度由 183.3 ± 1 至 183.3 ± 7 逐渐增大,但仍保持 $T_b(183.3 \pm 1) < T_b(183.3 \pm 3) < T_b(183.3 \pm 7)$ 。进入对流区后,亮温的分布出现了逆转,远离水汽吸收中心的通道亮温开始低于近中心通道。其主要原因在于,离水汽吸收中心越远,探测对流云的深度越深,可以感受来自对流云中低层的更多的冰粒子散射影响,其亮温下降也越快。这个变化为我们判定对流区提供了有益的启示。为此,引入一组新的判据,各通道亮温差,基本原则是由权重高度高的通道亮温减去权重高度低的通道:

$$\Delta T_{17} = T_b(183.3 \pm 1) - T_b(183.3 \pm 7)$$

$$\Delta T_{13} = T_b(183.3 \pm 1) - T_b(183.3 \pm 3)$$

$$\Delta T_{37} = T_b(183.3 \pm 3) - T_b(183.3 \pm 7)$$

图 7 给出了对应的亮温差的分布,从中发现,在晴空和卷云区 $\Delta T_{17} < 0\text{K}$, $\Delta T_{13} < 0\text{K}$, $\Delta T_{37} < 0\text{K}$, 进入对流云区后,结果出现了反转,变为 $\Delta T_{17} > 0\text{K}$, $\Delta T_{13} > 0\text{K}$, $\Delta T_{37} > 0\text{K}$ 。这主要由于,在通道频率距 183.1GHz 越远,其探测深度就越大,受中低层粒子散射的影响就越大。我们同时还注意到,在对流云区,虽然 3 个亮温差都大于 0,但大小并没有一致的规律,当进入冲顶对流区时(图 4 云图中积云突起区),亮温差大小分布出现了 $\Delta T_{17} \geq \Delta T_{13} \geq \Delta T_{37} > 0\text{K}$ 的规律。亮温差值 ΔT_{17} 、 ΔT_{13} 和 ΔT_{37} 从边缘到核心逐渐增加。但是,在部分对流核区,它们却出现了下降,但 $\Delta T_{17} \geq \Delta T_{13} \geq \Delta T_{37} > 0\text{K}$ 的规则依旧存在。这主要是因为,对于大的冰冻粒子,三者的亮温权重比较相似。

因此,我们可以得到对流云的微波亮温判据:

对流云:

$$\Delta T_{17} \geq 0, \Delta T_{13} \geq 0, \Delta T_{37} \geq 0\text{K},$$

对流上冲云顶:

$$\Delta T_{17} \geq \Delta T_{13} \geq \Delta T_{37} > 0\text{K}$$

3.2 扫描角订正

前文所讨论的微波对流判定方法是假设观测发生在星下点的位置。在实际观测中,微波仪器会进行大范围的扫描,AMSU-B 的扫描角度范围大约在 $\pm 48.95^\circ$ 之间,因此,在深对流判定中,还需要考虑卫星扫描角的影响,通过 VDISORT 辐射传输模式,可以模拟出不同扫描角情况下的亮温差异,根据模拟结果,我们可以建立卫星扫描角与亮温之间的统计关系,进而获得不同扫描角下的深对流判据。

3.3 微波对流判识算法

根据上述研究结果,得到如下微波对流云判识算法:

$$\Delta T_{17} \geq T_d, \Delta T_{13} \geq T_d, \Delta T_{37} \geq T_d$$

$$\Delta T_{17} \geq \Delta T_{13} \geq \Delta T_{37} > 0\text{K}$$

其中 T_d 等于:

$$T_d = 0.04761 - 0.01678\theta + 0.00599\theta^2$$

式中, θ 为扫描角。

4 结果分析

由于缺乏常规观测,只能采用间接判据来验证对流云判识结果。这里使用的判据包括与卫星同时次的 AVHRR 云图和 24 小时资料。

4.1 深对流探测结果与 AVHRR 云图

图 7(见彩页)给出了利用 NOAA-16 AMSU 资料反演得到的 2006 年 7 月 7 日 06:24 和 2006 年 8 月 12 日 02:44(世界时)强对流分布与同时刻可见光云图的叠加图。由图可见,微波判断的深对流区与可见光云图中的上冲云顶突起对应很好。

4.2 深对流探测结果与强降水

强降水往往由对流系统所引起,强对流系统的发展往往会造成较强降雨,本文选取了 6 月 19 日和 8 月 12 日 3 次降雨过程分析微波识别的对流区与降水的匹配情况,通过将深对流识别结果叠加到 24 小时降水量等值面图(图 8,见彩页)上(1 表示深对流,2 表示冲顶对流,底图为 24 小时降水),发现深对流区和冲顶对流区往往与强降水区相对应。

5 结 论

对流的识别是卫星应用的重点,常用的红外通道阈值法可以给出对流的强度信息,但阈值的选取受很多因素影响,很难十分精确,且红外通道仅能提供云顶信息,而密卷云

和积云的云顶亮温有时很难区分,仅用红外通道,可能会出现误判。微波通道具有穿透云的独特能力,可以探测到对流云的一些内部特征,定量识别深对流云和冲顶对流云,反映的对流信息也最为精确。

本文建立了一种利用 NOAA 卫星 AMSU-B 水汽通道亮温差定量判识深对流云和冲顶对流云的方法。本文方法对典型对流降水云团的判识结果显示,微波识别的对流云区可以较好的表征强降水的分布,其中的冲顶对流区与可见光云系的上冲云顶结构有着很好的对应。

虽然目前只有极轨卫星可以进行微波探测,探测时效和空间分辨率也较红外通道为低,但微波的对流探测可以作用静止卫星对流探测的重要验证和补充,利用相近时次的探测结果可以有效修正红外对流判识结果。我国第二代静止气象卫星(风云4号)将会搭载微波探测仪器,微波对流的监测能力将会得到进一步增强。

参考文献

- [1] 刘峰,李萍. 华南一次典型 MCC 过程的成因及天气分析[J]. 气象,2007,33(5): 77-82.
- [2] Spencer R W, Olson W S, Rongzhang W, et al. . Heavy thunderstorms observed over land by the Nimbus 7 Scanning Multichannel Microwave Radiometer[J]. J. Appl. Meteorol. , 1983, 22: 1041-1046.
- [3] 王小兰,程明虎,崔哲虎. 对流性降水云辐射特性研究[J]. 气象,2005,31(9): 3-7.
- [4] Adler R F, Mack R A, Prasad N, et al. . Aircraft microwave observations and simulations of deep convection from 18 to 183 GHz, Part I. Observations[J]. J. Atmos. Ocean Technol, 1990, 7: 377-391.
- [5] Yeh H-Y M, Prasad N, Mack R A et al. . Aircraft microwave observations and simulations of deep convection from 18 to 183 GHz, Part II. Model results [J]. J. Atmos. Ocean Technol. , 1990, 7: 392-410.
- [6] Muller, B. M. , Fuelberg, H. E. and Xiang, X. . Simulations of the effects of water vapor, cloud liquid water, and ice on AMSU moisture channel brightness temperatures[J]. J. Appl. Meteorol. , 1994, 33: 1133-1154.
- [7] Kidder S. Q. , Goldberg M. D. , Zehr R. M. , et al. . Satellite Analysis of Tropical Cyclones Using the Advanced Microwave Sounding Unit (AMSU)[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2000, 81(6): 1241-1259.
- [8] Weng F. Z. . A Multi-Layer Discrete-Ordinate Method for Vector Radiative Transfer in a Vertically-Inhomogeneous, Emitting and Scattering Atmosphere-I. Theory[J]. J. Quant. Spectrosc. Radiat Transfer. , 1992, 47(1): 19-33.

方翔等：应用AMSU-B微波资料识别强对流云区的研究

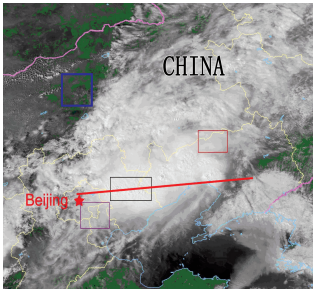


图 3 2005年8月12日06:14
NOAA-16云图(选区示意)

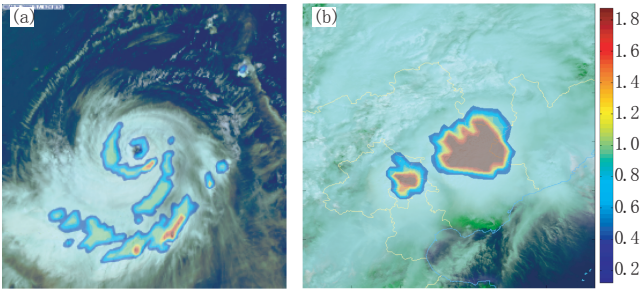


图 7 微波对流识别结果与云图叠加图
(a) 2006年7月7日06:24; (b) 2005年8月12日02:44

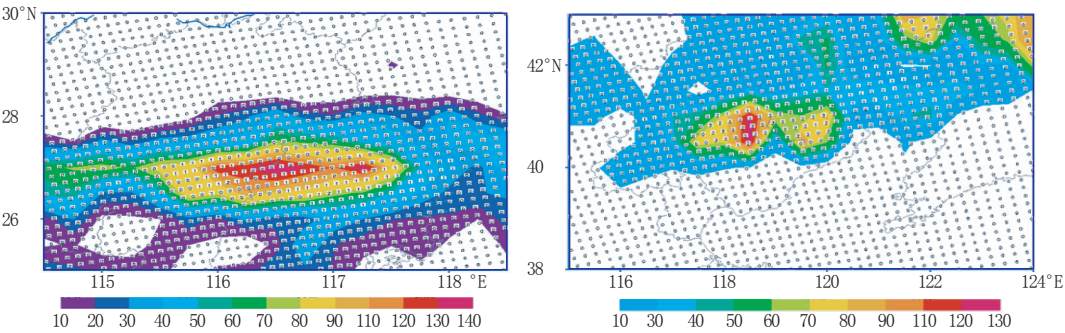


图 8 微波对流识别结果与雨量叠加图
(底图雨量, 叠加等值线为对流强度)