

用 TRMM 资料研究江淮、华南降水的微波特性*

吴庆梅¹⁾ 程明虎²⁾ 苗春生³⁾

¹⁾(北京市气象局,北京 100089)

²⁾(中国气象科学研究院,北京 100081)

³⁾(南京气象学院,南京 210044)

摘 要

热带测雨卫星 TRMM(Tropical Rainfall Measuring Mission)于1997年11月发射成功,其首次携带了空载雷达,有关资料已在网上对公众发布。利用热带测雨卫星上的微波成像仪 TMI(TRMM Microwave Imager)资料以及其和测雨雷达 TRMM/PR(Precipitation Radar)资料联合反演的地面瞬时降水产品,采用散射指数(I_s)法从理论上探讨了我国江淮、华南降水尤其是暴雨的微波特性,其中 I_s 表达式通过江淮、华南晴空 TMI 资料统计回归得到。以联合反演的地面瞬时降水产品为真值,用面积相当法对14个降水个例求 I_s 降水阈值,研究了阈值和降水面积以及 85.5 GHz 垂直通道最低亮温的关系,并寻求了 I_s 和降水的相关特征。研究表明: I_s 降水阈值随降水面积的增大或 85.5 GHz 垂直通道最低亮温的降低有增高的趋势; I_s 与强对流性降水瞬时雨强对应很好, $I_s \geq 60$ K 是一个好的暴雨指标。最后进行了初步的雨强反演试验研究,由于 TMI 资料分辨率的提高以及时空配合较好的真值,反演的地面瞬时降水与真值相关效果大大提高。

关键词: TMI 散射指数 降水阈值 瞬时雨强

引 言

卫星遥感克服了地基平台雷达和雨量计的局限,实现了全球观测和大范围观测^[1]。相对于红外/可见光间接反映云的厚度和高度而言,微波能够在一定程度上穿透云体而直接反映云体内部的降水信息,大气介质中云滴和降水粒子对微波辐射的影响是微波遥感降雨的物理基础。从原理上讲,微波资料估测降水应该更有效,但相对来说,微波资料分辨率较低,其估算降水的技术还有待进一步提高^[2~4]。

被动微波估测降水通常分为两类:物理方法和经验方法。物理方法早期是结合辐射传输方程和特定降水云系来估算降水,最近发展成结合辐射传输方程和云模式估算降水^[5]。经验方法又分为两种,即吸收/发射法和散射法。所谓吸收/发射法,就是通过液态雨滴本身对微波辐射的吸收/发射而建立起降水与微波辐射亮温之间的直接物理关系。在海洋冷背景条件下,降水的蒸发明显增加了窗区的上行微波辐射强度,但这种方法只适用于洋面,而且容易达到饱和,尤其是在高频波段。Spencer(1989)^[6]用 Marshall-

* 本课题受到国家重点基础研究发展规划项目(G1998040909),优秀归国留学人员重点基金共同资助。
2002-01-04 收到,2002-04-29 收到修改稿。

Palmer 降水粒子谱分布对特种微波成像仪(SSM/I)的不同频率的消光系数进行模拟计算表明,从 19.35 到 85.5 GHz,冰晶粒子的体积散射系数随频率的增加而剧增,而相比之下吸收系数却很小,如果散射系数足够大,对高频可造成非常低的亮温,另外雨滴半径变动于 0.2~6 mm 之间,大雨滴半径可达 6 mm 左右,因此,在微波段雨滴的散射降温作用也不能忽略,这就是散射法测雨原理。由于对微波辐射产生强烈影响的散射冰晶层主要是与对流降水区相关的大的冰晶粒子群造成的,卷云冰晶粒子对微波辐射来说,并没有造成可察觉的散射作用。在陆地地表条件下,与对流性降水相联系的冰晶层比海洋地表厚,这种方法更适用于陆地。

尽管散射法和吸收法已被广泛地采用,但是由于微波辐射的分辨率较低,且缺乏相应的校正资料等条件限制,其研究受到很大局限。TRMM 的发射为我们提供了高分辨率的微波资料,其所携带的测雨雷达被誉为“飞行的雨量计”,由 TRMM/PR 测雨雷达资料和 TRMM/TMI 微波资料联合反演的瞬时降水产品可作为相应的校正资料,大大方便了对微波方法的探讨和研究^[7~9]。本文即利用上述时空配合较好的地面瞬时降水产品为真值,采用散射指数法针对我国江淮、华南的 14 个降水个例,寻求散射指数降水阈值随降水面积及 85.5 GHz 最低云顶温度的变化规律,研究了散射指数与降水尤其是暴雨的相关特征,并对瞬时雨强进行了初步的反演研究。

1 TRMM 简介

热带测雨卫星 TRMM 是 1997 年 11 月由美日联合研制发射的专门用于测量热带降水的低轨低倾角卫星,并首次搭载了测雨雷达^[10]。卫星高度为 350 km,倾角为 35°,周期约 90 min,轨道范围位于 35°S~35°N,每天约有 15 条轨道不定时不定点通过热带地区,便于收集资料。搭载的测雨仪器有测雨雷达(PR)、微波成像仪(TMI)、可见光红外扫描仪(VIRS)。

TMI 有 5 个频率 9 个通道,频率分别为 10.65、19.35、21.3、37.0 和 85.5 GHz,它与美国国防气象卫星 DMSP 上的 SSM/I 仪器相近,但比 SSM/I 多一个 10.65 GHz 的频率。为避免饱和,水汽通道由 22.235 GHz 变为 21.3 GHz,除 21.3 GHz 外,其余频率都是双极化的。TMI 扫描宽度为 760 km,由于 TRMM 的低轨道低倾角,其分辨率较 SSM/I 成倍提高,视场不充满问题也有了一定改善。具体见表 1。

表 1 TMI 各通道参数

通道数	1	2	3	4	5	6	7	8	9
频率(GHz)	10.65	10.65	19.35	19.35	21.3	37.0	37.0	85.5	85.5
极化性	V	H	V	H	V	V	H	V	H
I FOV-DT(km)	59.0	60.1	30.5	30.1	27.2	16.0	16.0	6.7	6.9
I FOV-CT(km)	35.7	36.4	18.4	18.2	16.5	9.7	9.7	4.1	4.2
E FOV-CT(km)	9.1	9.1	9.1	9.1	9.1	9.1	9.1	4.6	4.6
E FOV-DT(km)	63.2	63.2	30.4	30.4	22.6	16.0	16.0	7.2	7.2

注:I FOV为瞬时视场,E FOV为有效视场,DT和CT分别表示沿轨道方向和垂直轨道方向,V代表垂直极化,H为水平极化。

测雨雷达 PR 是气象卫星上第一个主动式微波遥感仪器,其工作频率为 13.8 GHz,

扫描宽度为 220 km,垂直分辨率为 250 m,水平分辨率为 4.3 km。

2 资料

本文以 1998~2000 年 5~7 月华南、江淮的 14 个降水个例为研究对象,资料来源于美国宇航局分布式主动存储中心(NASA/DAAC)提供的 TRMM 卫星资料,包括 TMI 资料、地表状况资料以及 TMI/PR 联合反演的地面瞬时降水产品(mm/h),根据雷达回波图像尽量选择比较完整的降水云系。测雨雷达经与地基雷达多方面比较校正后两者的一致性很好,平均差别控制在 1 dB 内,可以用作微波方法的校正资料^[11~12]。联合反演首先由雷达回波反演降水,利用参数化的降水-辐射关系得到相应的亮温分布,再与 TMI 10.65 GHz 通道实测资料比较调整,充分利用了微波与雷达测雨的优势^[8]。因此,本研究用其降水产品作为降水真值。由于雷达扫描宽度比微波辐射计扫描宽度窄,我们只用两者重合部分资料,地面瞬时降水产品的分辨率为 4.3 km×4.3 km。由于降水和微波高低频率的分辨率不一样,我们对每点资料在 21.3 GHz 瞬时视场(27.2 km×16.5 km)内将 85.5 GHz 微波资料和降水真值资料进行了平均,所以对于降水其实是面积平均的地面瞬时雨强。其次 NASA 提供的降水和高低频率的微波资料是以轨道形式给出的,资料的采样距离均不一样,最后我们将资料距离统一为低频的采样距离(13.9 km×9.1 km)。

3 散射指数 I_s

从理论上来说,结合了辐射传输方程和云模式的物理方法能很好地反演降水,但我们的研究表明,NASA 利用该方法给出的微波降水在我国大陆上比实况偏少,其可能原因是由于降水云系的微物理结构的复杂性,其使用的云模式不能很好地模拟出我国大陆实际降水云的微物理结构,而经验性的吸收/发射法只适用于洋面,因此,我们采用经验性的散射法。Grodz(1991)^[13]通过耦合低频通道,定义散射指数 I_s (Scattering Index)定量表达散射效应,在陆地上 I_s 的物理实质就是利用晴天和雨天变化不明显的低频通道来耦合晴天 85.5 GHz 亮温,而雨天降水尤其是与降水相联系的冰晶层对高频 85.5 GHz 的散射效应非常强烈,两者之差便很好地反映了这种大的冰相粒子与大雨滴的散射效应。Ferraro 等(1995)^[14]发展了该方法,利用全球资料分别给出了陆地和海洋的 I_s 表达式,并求取了对 I_s 按降水整数平均的降水反演算式。针对我国大陆主要降水,我们利用 5~9 月江淮、华南晴空 TMI 资料共 143744 个样本,统计回归得 I_s 表达式为:

$$I_s = 362.88 - 0.526 T_{BV}(19) - 0.804 T_{BV}(21) + 0.003709 T_{BV}^2(21) - T_{BV}(85)$$

T_{BV} 为垂直极化通道亮温,括号里的数字为亮温对应通道的频率(GHz)。

4 I_s 降水阈值的确定及其与降水的相关

4.1 确定 I_s 降水阈值

记 I_s 耦合部分为:

$$T_{BV耦合}(85) = 362.88 - 0.526 T_{BV}(19) - 0.804 T_{BV}(21) + 0.003709 T_{BV}^2(21)$$

对一降水个例根据雷达资料分降水点和非降水点作 85.5 GHz 垂直通道实测与耦合亮温散点图,如图 1 所示。可见降水点和非降水点有较明显的区别,且非降水点的耦合与实测值相关很好,基本上分布在一条直线上,降水点与非降水点比较容易区别开来,这就是用 I_s 确定降水面积的前提。当然难免会存在一些歧义点,一来联合反演的降水并非完全正确,另一方面,由于降水微物理结构的复杂性,绝对的划分是相当困难的。

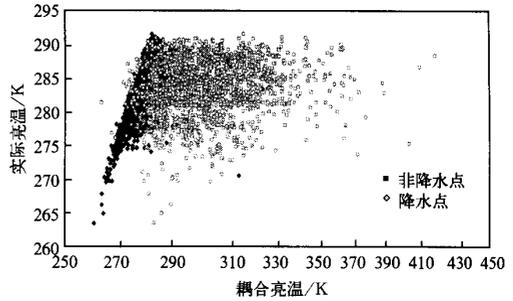


图 1 2000 年 6 月 24 日 19 :53(北京时,下同) 降水/非降水散点图

大气中水凝物的谱分布和相态变化都很大,其与云的种类、降水类型以及环境温度、地理位置以及年中不同季节都有很大关系。事实上,在任何一个降水云系里,降水和云水都有其特定的分布,定义一个能绝对划分降水和云水的固定阈值是不可能的,因此 I_s 降水阈值也应该因降水个例而异。本文利用“面积相当法”,对上述 14 个个例逐一求阈值,首先计算出每个个例联合反演的瞬时雨强 $\geq 0.5 \text{ mm/h}$ 的面积,同样地,对于 TMI 资料,当 I_s 为大于某值时,计算出的面积与上述面积相当,此值即为该个例的降水阈值。同时,我们检验了面积相当法的准确性,计算了两者重合面积与真值面积的比值(表 2),重合面积的比率越大,表示所计算的阈值越准确。

表 2 面积相当法得到的阈值及其准确性检验

个例数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
真值面积	677	627	419	500	440	446	465	528	243	255	207	384	611	226
重合面积	640	551	352	460	340	406	384	473	201	230	174	312	570	147
比率(%)	95	88	84	92	77	91	83	90	83	90	84	81	93	65
阈值(K)	12	8	8	14	5	9	6	8	10	6	7	10	9	6

注:面积单位为 $13.9 \text{ km} \times 9.1 \text{ km}$ 。

由表 2 可见,除两个个例外,两者的重合率均在 80% 以上,有的甚至达到了 95%,且降水越强,范围越广,重合程度越好。阈值的变化范围从 5 K 到 14 K,如果用一固定阈值,显然会导致错误的降水信息。我们对所有个例用面积相当法求得一平均阈值为 8 K,这与 Grody(1991)^[13]定义的 10 K 有所差别,原因在于其定义区域有雨的降水阈值可能大于 0.5 mm/h 。

4.2 I_s 降水阈值变化特征

上述阈值是在有对应降水资料的条件下求出的,如何根据微波资料本身确定降水阈值还有待进一步研究。这里初步研究了阈值与降水云系 85.5 GHz 垂直通道最低亮温以及面积(为 $I_s \geq 8 \text{ K}$ 的面积)的关系,为微波资料确定阈值打下基础。图 2a、2b 分别为阈值-面积散点图和阈值-最低亮温散点图,为避免资料本身错误,最低亮温取 5 点最低亮温的平均。由图 2a 和图 2b 可看出,总的趋势为,最低亮温越低,面积越大,阈值就越高,即

冰晶层愈厚,降水愈强,范围愈广,阈值愈大。但是就具体个例来说,也不尽然,不能只凭面积或最低亮温来确定阈值,须将两者结合相互诊断才能得出较满意的结果。如表3,个例9的最低亮温为89 K,远低于个例4的最低亮温155 K,但比较一下两者的面积,前者为271个点,后者为635个点,因此个例9的阈值10 K小于个例4的14 K。

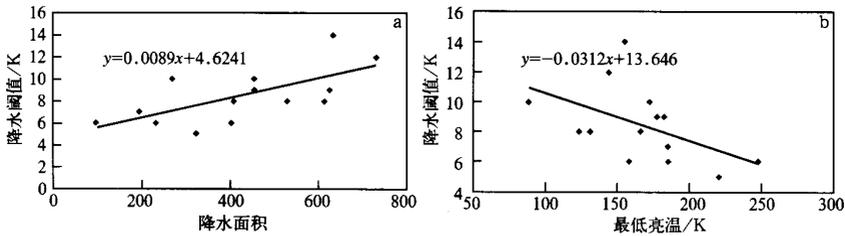


图2 I_s 降水阈值与降水面积(a)及最低云顶温度(b)散点图
(面积单位:13.9 km × 9.1 km)

表3 14个个例的降水面积 最低云顶亮温和 I_s 降水阈值

个例数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
面积	732	614	410	635	322	456	402	530	271	234	196	455	627	99
最低亮温(K)	145	166	131	155	221	182	185	124	89	158	185	173	178	248
阈值(K)	12	8	8	14	5	9	6	8	10	6	7	10	9	6

注:面积单位为13.9 km × 9.1 km。

要想准确地确定阈值,还须结合降水机制和降水的发展阶段等,由于 TRMM 观测时次有限,缺乏连续观测资料,暂且不作研究。一般来说,降水形成后的阈值比降水形成前要低,如表3的个例1和个例2,综合最低亮温和面积,很难确定两者阈值的高低,但由后面的分析可知,个例1处于发展阶段,个例2的降水已形成,所以前者阈值比后者高。

4.3 I_s 与降水的相关

为了寻求 I_s 和地面瞬时雨强的相关特征,我们对14个降水个例逐个选取经过降水中心的扫描线,作该扫描线上的降水真值与 I_s 的折线图,可以看出, I_s 与降水的变化趋势除个别个例外,都非常一致,只是在程度上有所差别,且降水越强,一致程度越好。当 I_s 一定时,对应的降水也因个例而异,大小有所不同。尤其值得注意的是,14个降水个例中, I_s 最大值 ≥ 60 K 的6个降水个例无一例外有强降水发生,图3为6个强降水个例的折线图,图底标明的个例数目与表2、表3中的个例顺序一致。可见除图3a与图3c降水最大值约20 mm/h稍偏小外,其它降水最大值均 ≥ 30 mm/h。图4a与图4b分别为图3a、图3b对应的85.5 GHz垂直通道亮温图,“+”标志的地方为两条扫描线经过的地方,根据两者的时间及降水云系的形状知图3a与图3b为同一降水云系的大致相同部分,且图3a处于发展阶段,降水尚未成熟,我们认为这就是图3a降水偏小的原因。降水最大值与对应的 I_s 极值(并不一定是 I_s 最大值)有一个或几个像素点的错位,我们认为,对于强对流性降水,其降水层上部的冰晶层很厚,来自其下面的降水信息大部分被散射掉了, I_s 反映的主要是上部冰晶层信息,当 I_s 达到最大时,预示着对流发展也到达了鼎盛,而此时往往大的降水将至未至,当降水发展成熟,云顶塌陷时,降水才达到最大,导致了这种错

位。由于我们研究的是瞬时降水, I_s 最大处没有大的降水只是一个时间问题, 从 I_s 代表降水

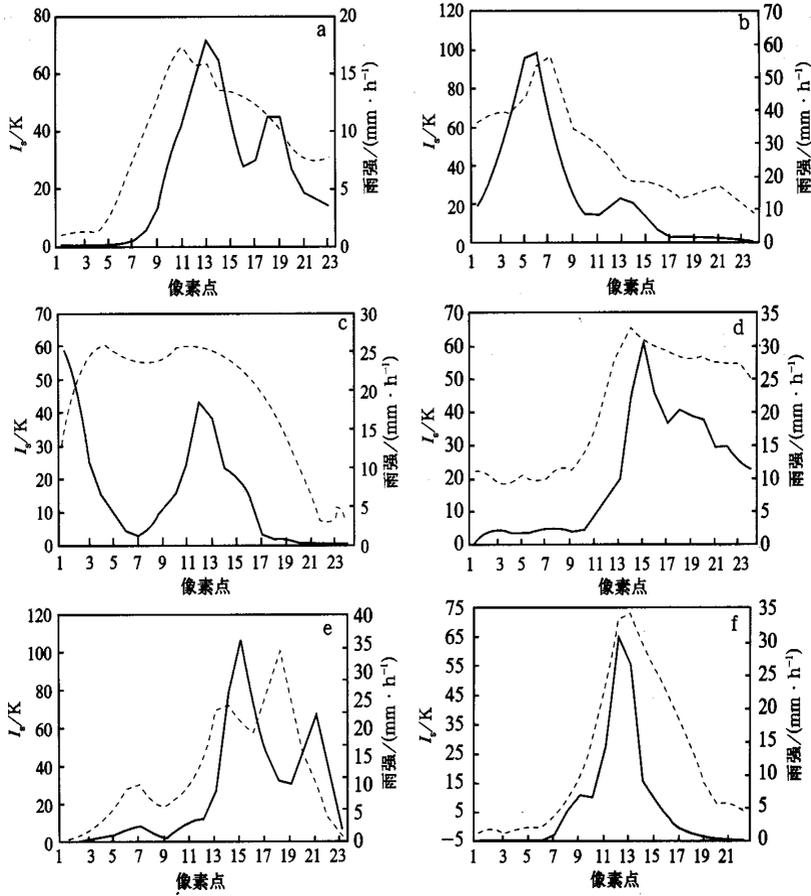


图 3 瞬时雨强和 I_s 折线图(实线代表雨强, 虚线代表散射指数)

(a) 个例 1, (b) 个例 2, (c) 个例 3, (d) 个例 4, (e) 个例 8, (f) 个例 10

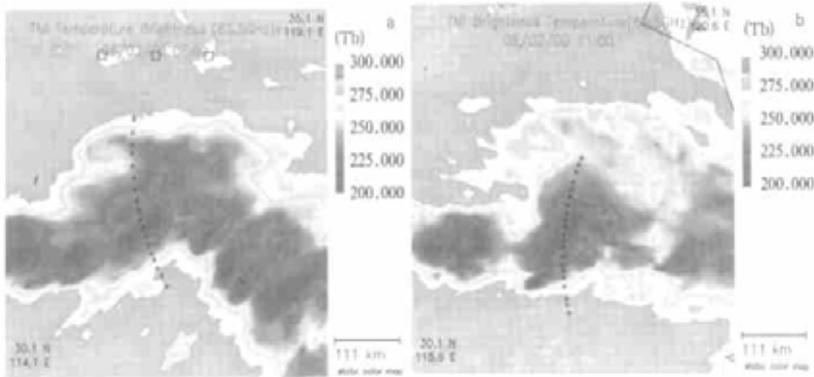


图 4 TMI 85.5 GHz 垂直极化通道亮温图像

(a) 2000 年 6 月 2 日 07:38, (b) 2000 年 6 月 2 日 11:00

层上部冰晶层来说,大的 I_s 表征了厚的冰晶层,而云团气流的承托力是有限的,最终会以降水/降雹(对夏季江淮、华南降水而言)的形式落到地面。

总的来说,用 I_s 反演降水是完全可行的,其与降水尤其是强对流性降水存在很好的正相关关系,对于强对流性降水,其冰晶层厚且大雨滴的散射作用也强,这种相关因降水性质和降水阶段而异,对降水分类分阶段反演将更准确, $I_s \geq 60$ K 是一个很好的暴雨指标,不过要对暴雨中心稍作诊断。

5 建立雨强反演算式

用 I_s 反演雨强,首先要找出其与降水强度的关系,因此,作瞬时雨强- I_s 散点图。如前所述,必须经过插值和归一化处理,前面结果都是经过处理得到的。为比较起见,图 5a、5b 给出了处理前后的瞬时雨强- I_s 散点图,资料为上述 14 个个例所有 ≥ 0.5 mm/h 的降水点。后者在前者插值的基础上取权重且经过了归一化处理,也就是在低频视场内将高频资料和降水平均,相关效果显著提高。

由图 5b 可见,当 $I_s \leq 60$ K 时,相关效果不错, I_s 继续增大时,效果变差。一方面由于降水增大,冰层加厚时,出现饱和现象,高频亮温趋向于冰层平均亮温,同时视场不充满问题也更加严重;另一方面,就是前面所说的错位效应,可以看出特别大的降水往往出现在 60~90 K 处, I_s 继续增大,降水反而变小,这种现象也进一步说明了上述错位效应的存在。与折线图相比,散点图效果差一点,首先不同降水个例降水特性不同,其次弱降水个例相关效果不如强降水好。在图 5b 散点图的基础上用统计方法求出的线性和非线性面积平均瞬时雨强反演算式分别为 $R_{\text{线性}} = 0.2707 I_s - 2.2523$, $R_{\text{非线性}} = 0.0899 I_s^{1.111}$,相关系数分别为 0.6257 和 0.6297。由于吸收/散射系数与滴谱粒子半径大小有关,产生散射效应的粒子不仅包括大的降水雨滴,更有与降水相联系的冰晶粒子,所以 I_s 与降水之间不可能是简单的线性或非线性相关,给出的降水公式只是一种经验统计。

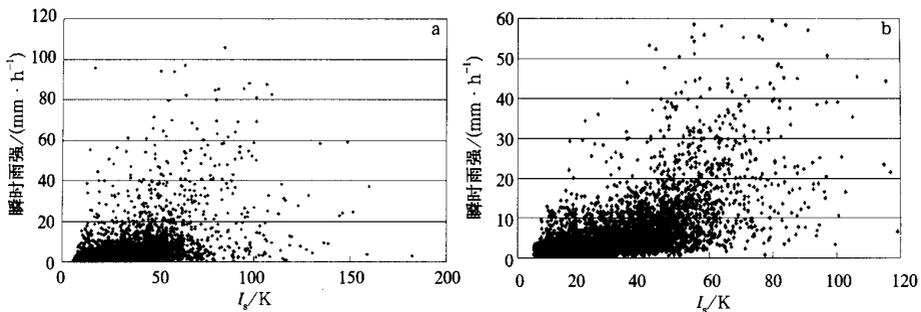


图 5 地面瞬时雨强- I_s 散点图

(a) 处理前, (b) 处理后

6 结 论

本文主要利用 TRMM/TMI 微波资料和 TMI/PR 联合反演的地面瞬时降水产品研

究了我国华南、江淮降水的微波特性,得出如下主要结论:

(1) I_s 降水阈值因降水个例而异,且随降水面积增大而增大,随云顶温度升高而降低。

(2) I_s 与强对流性降水有很好的相关, $I_s \geq 60$ K 是一个好的暴雨指标。

(3) 反演值与真值较好的相关性表明了 I_s 法的可行性,由于 I_s 对应的是降水层上部冰晶层,用它来反演强对流降水效果很好,对降水的分类分阶段反演将更有效。

由于 TRMM 为低轨低倾角卫星,资料时次少,且轨道窄,很难捕捉到连续完整的降水个例,个例数目也偏少,因此本文只是粗略研究了 I_s 降水阈值与降水面积和最低云顶亮温的关系,与其它参数的关系还须进行更细致地研究,同时对降水的分类分阶段反演也受到限制。

参 考 文 献

- 1 陈渭民,夏浣清,陈光宇.卫星气象学.北京:气象出版社,1989.1~9.
- 2 Cheng M. Estimation of Precipitation Using Satellite, Radar and Rain Gauge: [Ph.D. Thesis]. University of Bristol, 1994.
- 3 Cheng M, Brown R, Collier C G. Delineation of rain areas using Meteosat infrared and visible data in the region of the United Kingdom. *Journal of Applied Meteorology*, 1993, **32**: 884 ~ 898.
- 4 周秀骥. 大气微波辐射及遥感原理. 北京:科学出版社,1982. 71 ~ 88.
- 5 Liu G, Curry J A. Retrieval of precipitation from satellite microwave measurement using both emission and scattering. *Journal of Geop. Hysical Research*, 1992, **97**: 9959 ~ 9974.
- 6 Spencer R W, Goodman H M, Hood R E. Precipitation retrieval over land and ocean with the SSM/I: Identification and characteristics of the scattering signal. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 1989, **6**(4): 254 ~ 273.
- 7 Kummerow C D, Simpson J, Thiele O, et al. The status of the Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) after two years in orbit. *Journal of Applied Meteorology*, 2000, **39**(12): 1965 ~ 1982.
- 8 Haddad Z S, Smith E A, Kummerow C D, et al. The TRMM "day-1" radar/ radiometer combined rain-profiling algorithm. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 1997, **5**(4): 799 ~ 809.
- 9 Cheng Minghu, He Huizhong, Mao Dongyan, et al. Study of 1998 heavy rainfall over the Yangtze river basin using TRMM data. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2001, **18**: 387 ~ 396.
- 10 Kummerow C D, Barnes W, Kozu T, et al. The Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) package. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 1998, **15**(6): 809 ~ 817.
- 11 Aonashi, Kazumasa and L G. Passive microwave precipitation retrievals using TMI during the Baiu period of 1998. Part I: Algorithm description and validation. *Journal of Applied Meteorology*, 2000, **39**(12): 2024 ~ 2037.
- 12 Shin D, North G R, Bowman K P. A summary of reflectivity profiles from the first year of TRMM radar data. *Journal of Climate*, 2000, **13**: 4072 ~ 4086.
- 13 Grody N C. Classification of snow cover and precipitation using the Special Sensor Microwave /Imager (SSM/I). *J. Geophys. Res.*, 1991, **96**: 7423 ~ 7435.
- 14 Ferraro R R, Marks G F. The development of SSM/I rain-rate retrieval algorithms using ground-based radar measurements. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 1995, **12**(8): 755 ~ 770.

STUDY OF MICROWAVE CHARACTERISTICS OF RAINFALL OVER SOUTH CHINA AND YANGTZE RIVER BASIN USING TRMM DATA

Wu Qingmei¹⁾ Cheng Minghu²⁾ Miao Chunsheng³⁾

¹⁾ (Beijing Meteorological Bureau, Beijing 100089)

²⁾ (Chinese Academy of Meteorology Sciences, Beijing 100081)

³⁾ (Nanjing Institute of Meteorology, Nanjing 210044)

Abstract

TRMM (Tropical Rainfall Measurement Mission) was launched in December 1997, which carried a space radar for the first time and the related data have been made available to the public users since June 1998. The microwave characteristics of rainfall over South China and the Yangtze river basin are investigated by using TMI (TRMM Microwave Imager) data and TRMM derived precipitation products through I_s (Scattering Index) algorithm. The expression of the I_s is regressed by the TMI data on sunny days. For 14 rainfall cases, the relationship between the I_s precipitation threshold obtained through the "area equal" method and the precipitation area and the coldest top temperature of 85.5 GHz vertical channel is investigated. At the same time, the correlation between I_s and surface instantaneous rain intensity is studied. The result shows that the I_s threshold has the increasing tendency when the precipitation area increases or the top temperature decreases, and $I_s \geq 60$ K is a good index of rainstorm. The instantaneous rain intensity is retrieved, and it is found that I_s can be used to retrieve rain intensity better because of the improvement of data resolution and the temporal and spatial consistency of the data.

Key words: TMI Scattering index Threshold Instantaneous rain intensity