

热带测雨卫星测雨雷达探测的亚洲夏季积雨云云砧^{*}

傅云飞 冯 沙 刘 鹏 曹爱琴
FU Yunfei FENG Sha LIU Peng CAO Aiqin
刘显通 李 锐 刘 奇 王 雨
LIU Xiantong LI Rui LIU Qi WANG Yu

中国科学技术大学,合肥,230026

University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China

2008-08-22 收稿,2008-11-18 改回.

Fu Yunfei, Feng Sha, Liu Peng, Cao Aiqin, Liu Xiantong, Li Rui, Liu Qi, Wang Yu. 2010. The cumulonimbus incus in summer Asia as detected by the TRMM PR. *Acta Meteorologica Sinica*, 68(2):195-206

Abstract The precipitation type of “others” defined in the algorithm of the Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) Precipitation Radar has not been attached importance to for long time. So it’s unknown what their physical significances are. Based on cases analysis and statistics analysis, the “others” precipitation in summer Asia of the last ten years was investigated. The case analyses indicate that the profiles of the “others” show the shape of cumulonimbus incus with the profile peak (about 0.6–1.0 mm/h) appearing at the altitude of 8–10 km, together with the mean reflectivity over 0.8 and mean infrared brightness temperature below 215 K. According to these features of cumulonimbus incus profiles, statistics on cumulonimbus incus is performed with the accumulative total rain rate greater than 1 mm/h above 5 km altitude defined as the incus profile in this paper. The results reveal that the cumulonimbus incus samples are near 70% of the total samples of “others” type with their occurring frequency ranging from 0.1% to 0.4% in summer Asia, which is at least in excess of a tenth of the convective precipitation frequency therein. The results also show that the frequency of cumulonimbus incus over land is greater than that over ocean. Generally, the averaged thickness of cumulonimbus incus is about 3–4 km with its bottom located at 6 km altitude and its top altitude of about 10–12 km. The statistical calculations indicate that the mean reflectivity for such cumulonimbus incus is from 0.8 to 0.9 with the mean infrared brightness temperature below 220 K.

Key words TRMM, Precipitation radar, “Other” type precipitation, Cumulonimbus incus

摘 要 热带测雨卫星(TRMM)测雨雷达探测产品资料中“其他”类型降水一直被忽略,它具有什么物理含义也无从知晓。文中利用个例分析和统计分析方法,对10年夏季亚洲“其他”类型降水进行了研究。个例分析结果表明“其他”类型降水的平均廓线表现了积雨云云砧特征,其廓线峰值(约0.6—1.0 mm/h)高度位于8—10 km,且云砧顶部具有0.8以上的可见光平均反射率和低于215 K远红外平均亮温;根据个例中积雨云云砧廓线特点,文中定义5 km以上各层累计降水率大于1 mm/h为云砧廓线,对亚洲夏季积雨云云砧样本进行了统计,结果表明该地区夏季云砧样本占“其他”类型降水样本总数的近70%;统计结果还表明夏季亚洲积雨云云砧出现频次为0.1%—0.4%,它至少超过对流降水频次的十分之一,亚洲云砧出现频次的特点是陆面高于洋面;云砧的结构特点表明云砧平均厚度3—4 km,其底部高度约6 km,顶部高度在10—12 km;云砧的平均可见光反射率在0.8—0.9,远红外平均亮温低于220 K。

关键词 热带测雨卫星, 测雨雷达, “其他”类型降水, 积雨云云砧

中图法分类号 P435

^{*} 资助课题:中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX2-YW-Q11-04、KJ CX2-YW-N25)、科技基础性工作专项重点项目(2007FY110700)、国家自然科学基金重点项目(40730950)。

作者简介:傅云飞,主要从事卫星遥感分析和反演及在天气气候领域的应用研究, fyf@ustc.edu.cn

1 引言

夏季积云发展至强盛阶段形成积雨云。积雨云中上升气流强烈,在其上部形成出流,使云顶常呈现砧状。积雨云的云砧也是卷云形成的原因,它由冰晶组成,其高度常在6000 m以上。与降水云相比,云砧中冰晶粒子尺度和含水量(冰晶含量)不太大,使其难以在波长大于5 cm的测雨雷达回波信号中反映,因此卷云这类非降水云只能用云雷达才能有效探测。因探测困难等诸多因素的缘故,迄今为止,对积雨云云砧的研究还甚少,积雨云云砧的空间分布及垂直结构特点亦不甚清楚。然而,热带测雨卫星(TRMM)搭载的2.2 cm波长的测雨雷达探测,为我们认识积雨云云砧提供了机会。该测雨雷达波长较短,虽然不能对所有卷云进行探测,但对积雨云云砧应该具有一定探测能力。但是,TRMM测雨雷达的这个探测能力却一直被人们忽略。学者们主要利用该雷达探测结果对层云降水和对流降水进行了大量研究(Liu, et al, 2001;姚展予等,2003;Fu, et al, 2003, 2006, 2007;郑媛媛等,2004;李锐等,2005;Bhatt, et al, 2005;Yang, et al, 2006;何文英等,2006;刘奇等,2007;傅云飞等,2008),揭示了这两类降水云的特征。“其他”类型降水作为TRMM测雨雷达降水分类方案中的第3类降水,却一直被认为降水强度小、对总降水的贡献不大(Liu, et al, 2001;Fu, et al, 2003;Schumacher, et al, 2003)而被忽略。

根据TRMM测雨雷达降水分类方案(测雨雷达产品2A23中的雨型分类算法,Steiner, et al, 1995;Awaka, et al, 1998),对流降水和层云降水的判定是依据雷达廓线中存在的亮带、回波顶高度、最大反射率及回波信号的水平梯度变化等信息,而非对流降水、非层云降水的剩余降水则被定义为“其他”类型降水,即“其他”类型降水回波信号中,既不存在层云的标识(亮带),亦不存在强度大于对流降水阈值(39 dBz)的回波。因此,“其他”类型降水被认为可能是雷达回波“噪音”或是没有达到地表(海表)的弱降水(Schumacher, et al, 2003)。本文试图通过对TRMM测雨雷达10年探测的“其他”类型降水的分析,以认识这类降水的特点。文章首先

通过个例分析,证实该类降水廓线表征积雨云云砧;随后通过统计分析,揭示夏季亚洲积雨云云砧的分布和垂直结构特点。

2 资料及方法

本文所使用的资料为TRMM测雨雷达二级产品资料2A25,它也是逐轨级资料。2A25给出了经Z(雷达回波强度)—R(降水率)关系反演得到的三维降水率,即测雨雷达扫描宽度(约220 km)上自地表垂直向上20 km内的降水率(称为降水廓线),其水平分辨率约4.5 km(星下点),垂直分辨率为0.25 km。根据2A23资料对降水类型的划分,2A25同时提供了降水类型信息(Steiner, et al, 1995;Awaka, et al, 1998;Kummerow, et al, 1998)。在第6版2A25资料中,层云降水的标识符定义为100—170的整数,对流降水标识符为200—291的整数,而“其他”类型降水以300、312、313整数标识,分别代表“其他”类型降水中的确定型、浅薄型及条件浅薄型。本文仅选用确定型“其他”类型降水作为研究对象。

考虑到TRMM测雨雷达探测灵敏度(17 dBz,约对应于0.4 mm/h,Schumacher et al,2003),若确定型“其他”类型降水廓线(即样本)所有层次(共20层)中的降水率均没有超过0.4 mm/h,则将这些样本作为“噪音”剔除,剩余的样本即为有效“其他”类型降水。在亚洲范围内(0°—40°N, 60°—160°E),2A25资料中10年夏季“其他”类型降水样本为1041967,有效样本为1041824,“噪音”样本为143。可见“噪音”样本所占比例极小,不超过总样本的0.014%,由此可见TRMM测雨雷达探测结果的数据处理也非常成功。因此,下文中“其他”类型降水均为有效的确定型“其他”类型降水。

10年夏季亚洲“其他”类型降水廓线样本的分布如图1所示(分辨率为 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$,即格点为 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$)。它表明夏季青藏高原南侧和30°N以北亚洲陆面(包括夏季青藏高原上)的每格点内样本数都超过200个;亚洲其他地区在10—200,其中70%以上的洋面格点样本数为50至200,陆面上具有50至200样本数的格点总面积为陆面的80%以上。因此,本文研究结果具有统计意义。

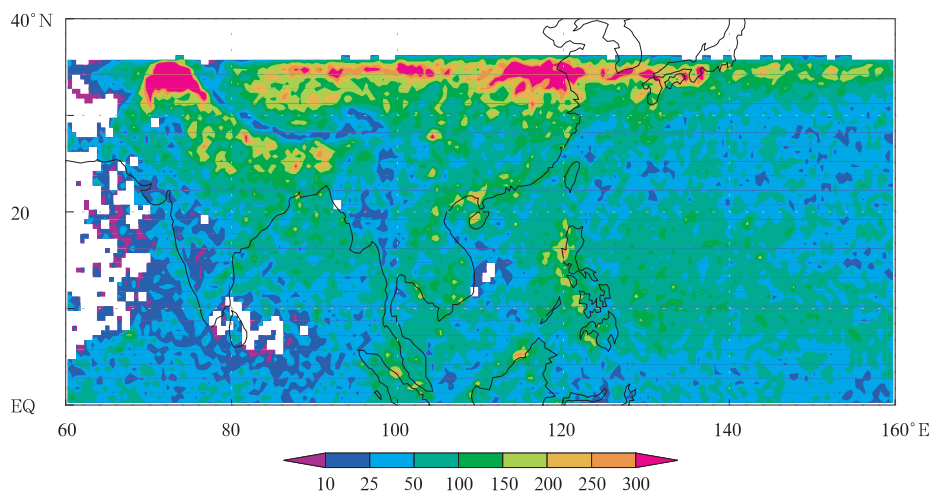


图1 1998—2007年夏季亚洲地区“其他”类型降水样本分布

Fig. 1 The sample distribution of the “others” in summer Asia for the last ten years

为了佐证这些“其他”类型降水表征积雨云云砧,本文还用到了 TRMM 可见光和红外辐射计(VIRS)探测的可见光反射率、近红外、远红外资料(1B01),其水平分辨率约 2.2 km(星下点)。根据云的光谱特性,VIRS 的可见光通道(ch1, $0.63 \mu\text{m}$)反映云的光学厚度和粒子大小,云越厚且粒子越小,该通道的反射率也越大;VIRS 的近红外通道(ch2, $1.6 \mu\text{m}$)则表现为对云粒子尺度的敏感,粒子尺度越大(如水云),则在该通道表现为强信号,由于水云和冰云粒子尺度差异大,该通道常用来区分云的相态;中红外通道(ch3, $3.75 \mu\text{m}$)既接收了云顶反射的太阳辐射,又接收了云顶发射的红外辐射,因此白天和夜晚该通道的信号差异;而远红外 $10.8 \mu\text{m}$ (ch4)和 $12.0 \mu\text{m}$ (ch5)通道则接收的是表面(云顶或地表)热辐射,云顶越高,这两个通道的亮温越低,

但因 ch4 通道为窗区通道、ch5 稍偏离窗区,因此 ch4 通道较 ch5 通道的亮温约高 2 K。此外,由于 VIRS 较测雨雷达具有更高的水平分辨率,为便于了解各廓线相应的 VIRS 各通道信息,我们用距离权重方法对 1B01 和 2A25 进行了匹配,这样 2A25 资料中的每条廓线均有相应的可见光和红外信号。

为确定“其他”类型降水廓线所表征的物性,本文任意选取了 4 个对流降水个例(表 1),它们分别是中国东部大陆的热对流降水(2003 年 8 月 2 日午后,傅云飞等,2005)、中国中西部对流降水系统(2008 年 6 月 22 日)、南中国海北部靠近珠江口对流降水系统(2008 年 7 月 11 日)和中国东部大陆对流降水(2008 年 8 月 1 日)。表中的降水像素统计表明,这些降水系统中的层云降水面积最大、对流降水面积次之,而“其他”类型降水面积最小。

表1 TRMM PR 探测的 4 个对流降水系统发生的时间、地点及相应的像素数量

Table 1 Occurrence time, location and pixel numbers of the four convective precipitation systems of “other” type as well as the convective and stratiform precipitation, as detected by TRMM

	时间(北京时)	范围	其他类型	对流降水	层云降水
热对流(No. 32565)	2003 年 8 月 2 日 15 时 30 分	(26° — 31°N , 115° — 120°E)	121	436	511
中尺度对流(No. 60407)	2008 年 6 月 22 日 22 时 44 分	(28° — 33°N , 109° — 114°E)	53	408	1266
中尺度对流(No. 60696)	2008 年 7 月 11 日 11 时 47 分	(18° — 24°N , 112° — 118°E)	167	582	2044
中尺度对流(No. 61003)	2008 年 8 月 2 日 03 时 03 分	(30° — 35°N , 112° — 122°E)	73	796	2267

图 2 和图 3 分别为测雨雷达和 VIRS 第 4 通道给出的它们近地表降水率分布和红外亮温分布。从图 2 中可清楚地看到热对流降水的块状雨团(图

2a)、强降水(图 2b、2c、2d 黄色和红色区)雨团周边及附近的大片弱降水区(图 2b、2c、2d 绿区色),而图 3 则表明这 4 个对流降水系统具有低于 230 K 的亮

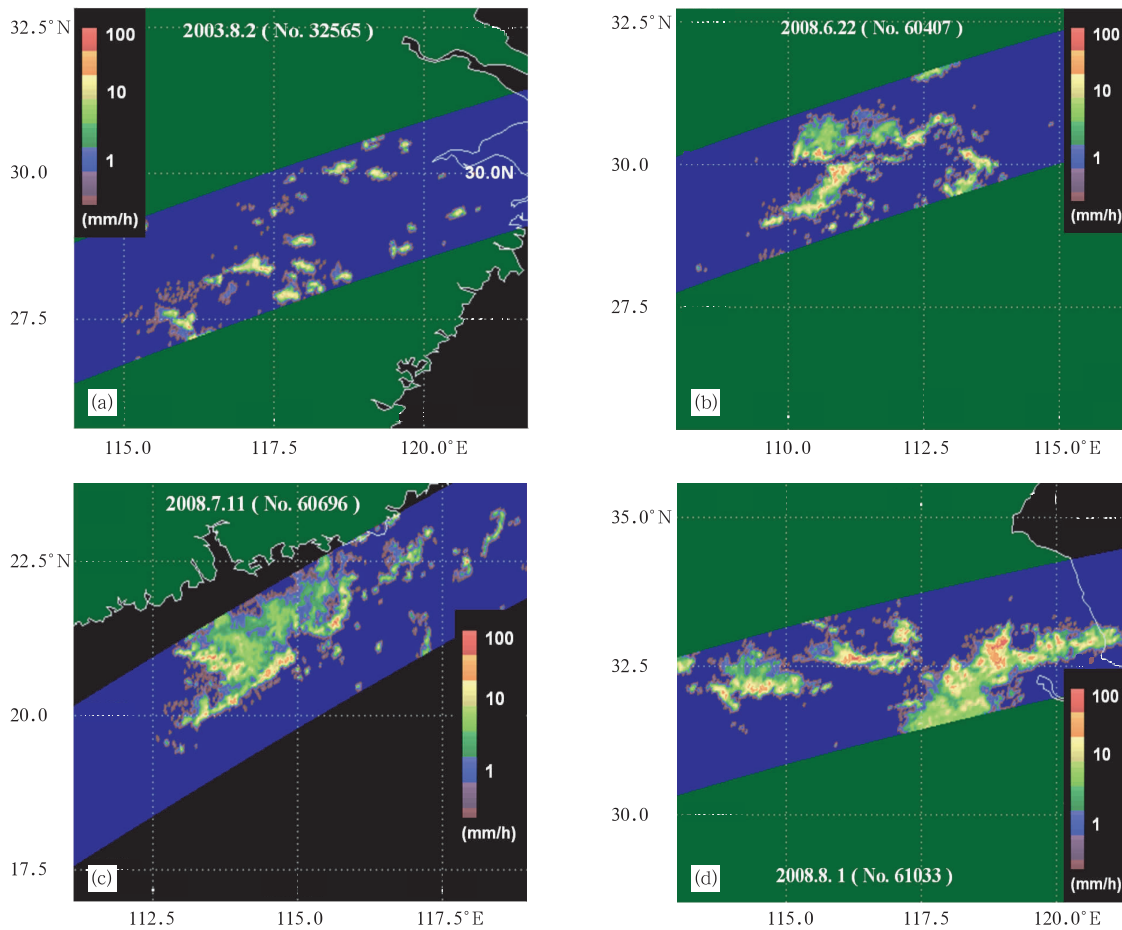


图2 TRMM 测雨雷达探测的 4 个对流降水系统(热对流(a)、中尺度对流(b、c、d))的近地表降水率(图中数字为时间和 TRMM 轨道号)

Fig. 2 Near surface rain rates of the four convective precipitation systems as detected by the TRMM PR ((a): thermal marked convective precipitation, and (b) – (d): meso-scale-convective precipitation with time and swath number indicated)

温区,其中强降水区相应的亮温多低于 210 K,说明对流降水系统的云顶很高;对比图 2 和图 3 可知,这些对流降水系统的云面积大于降水面积。以下将首先利用这 4 个对流降水个例,分析“其他”类型降水在降水系统中的位置、降水廓线特点及相应可见光和红外信号特点,以证实这些“其他”类型降水廓线即代表了积雨云的云砧廓线。

3 结果

3.1 个例分析

为了解 4 个对流降水个例中“其他”类型降水在对流降水系统中的部位,图 4 给出了 TRMM 测雨

雷达探测的对流降水、层云降水及“其他”类型降水的廓线空间位置分布。图中可见对流降水块(图中红色)的周边常有层云降水(图中蓝色)相邻,大片层云降水区常出现在对流降水系统的某一侧(图 4b 和 4c)、或出现在对流降水区的某一侧(图 4d),估计这就是所谓对流降水衰亡演变为层云降水的降水演化过程(Houze, 1997)。而“其他”类型降水常常位于对流降水和层云降水组成的降水云团某侧边沿,如图 4a 中热对流雨团的西侧、图 4b 中对流降水区的西北侧、图 4c 中对流降水区的西南侧和东南侧。由此可初步推测,这些“其他”类型降水很可能是强对流降水云团向外沿伸出的云砧。

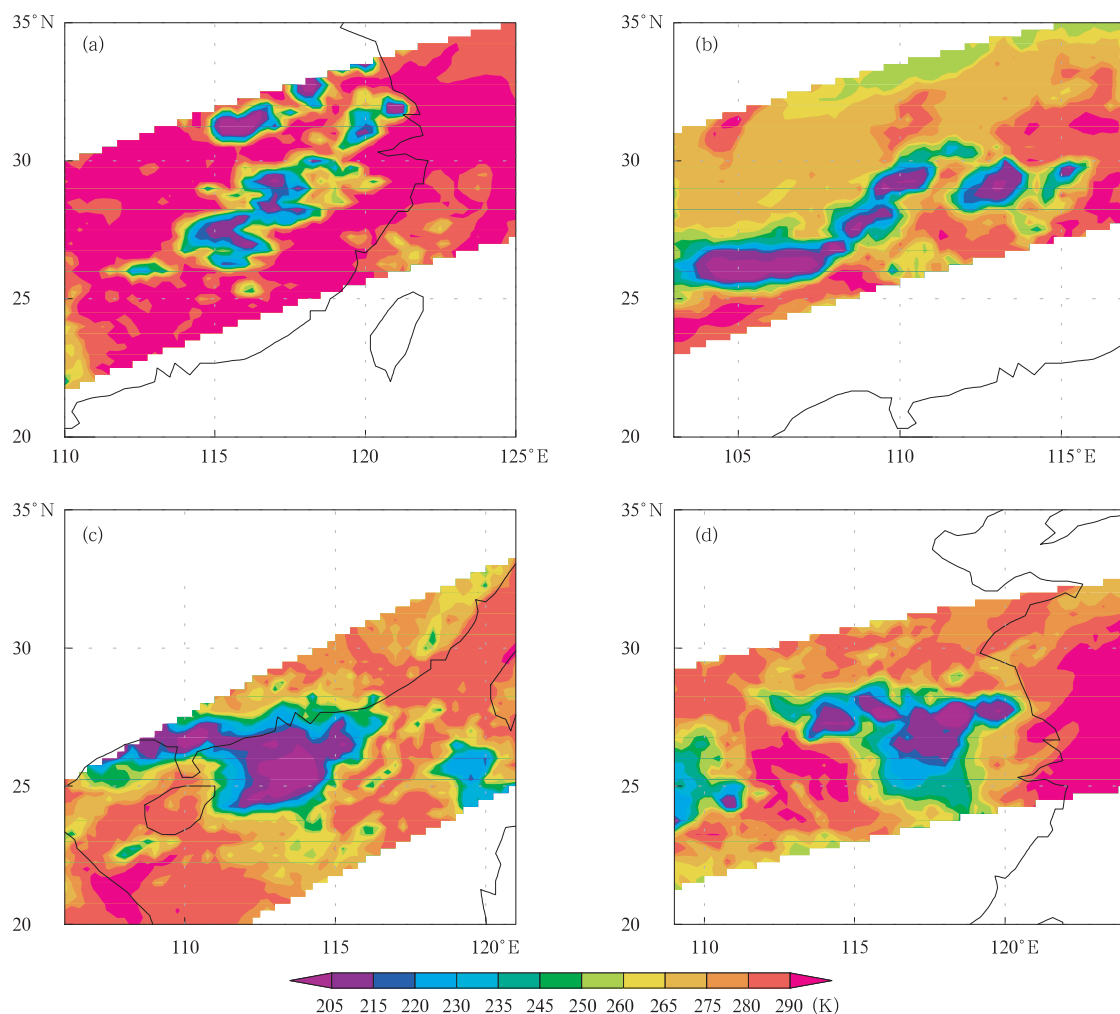


图3 TRMM VIRS 第4通道探测的4个对流降水系统
(热对流(a)、中尺度对流(b,c,d))的红外亮温

Fig. 3 Infrared brightness temperature of the four convective precipitation systems as detected by the TRMM VIRS at channel 4

((a): thermal convective precipitation, and (b) - (d): meso-scale convective precipitation)

为证实这一推测,分析与这4个对流降水个例对应的“其他”类型降水、对流降水和层云降水的平均降水廓线(图5)表明,尽管这4个对流降水系统出现时间和空间各不相同,但它们3种降水类型的平均降水廓线却具有共同外形特征。对流降水和层云降水的平均廓线特征与已有研究结果(Fu, et al, 2003, 2006;傅云飞等,2008)相似,如对流降水平均廓线表现了对流降水云团高度可达15 km、近地面降水率在5 mm/h以上、冻结层以上和以下降水率变化剧烈的特征;层云降水的平均廓线则表明层云降水云团中冻结层以下降水率变化小、且近地面降水

率也小(均在3 mm/h以下)的特征。而对“其他”类型降水而言,其平均廓线表现十分独特,廓线在8—10 km高度达到峰值(约0.6—1.0 mm/h)、5 km高度以下和11 km高度以上降水率很小(小于0.3 mm/h)。不言而喻,这种降水廓线所表现的物理意义十分清楚,它们应该对应于强对流降水系统延伸出的云砧。

4个对流降水系统中云砧顶部在可见光和红外信号上的表现也很清楚,表2中为VIRS测得4个对流降水系统中云砧顶部所对应的平均反射率和平均红外亮温,从中可看到云砧(个例1和3)比对流

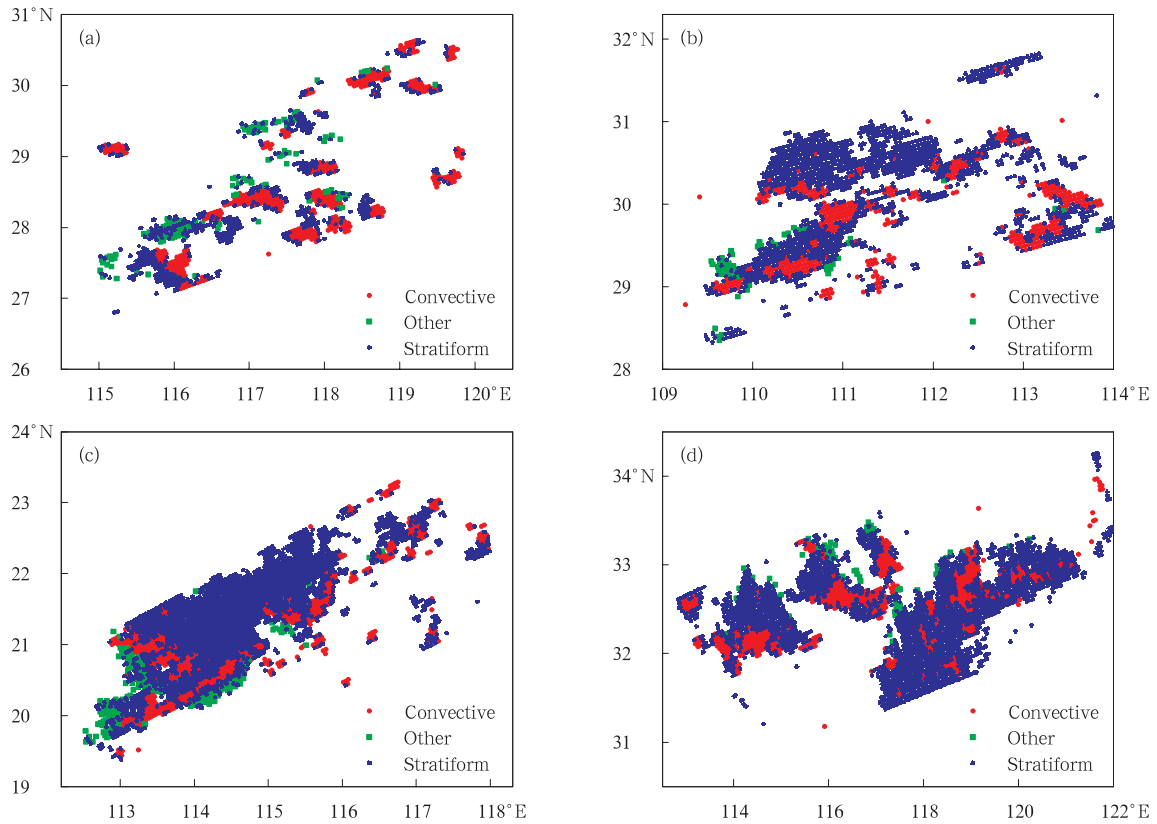


图4 TRMM 测雨雷达探测的4个对流降水系统中对流降水、层云降水和“其他”类型降水廓线空间位置分布

(a. 为热对流降水系统(case1); b,c,d 为中尺度对流降水系统(case2, case 3, case 4))

Fig. 4 Pixel distribution of the convective precipitation, stratiform precipitation and “other” type precipitation for the four convective systems mentioned in Fig. 2;

(a); thermal convective precipitation (case 1), and (b) – (d); meso-scale-convective (case2, case 3, case 4)

表2 4个对流降水系统中云砧、对流和层云降水云顶所对应的 VIRS 平均反射率和平均红外亮温

Table 2 Mean reflectivity and mean infrared brightness temperature of the incus, convective precipitation and stratiform precipitation in the four convective systems

	Ch1	Ch2	Ch3	Ch4	Ch5
No. 32565 云砧	0.86	0.22	259.5	214.0	211.8
No. 32565 对流降水	0.71	0.18	263.5	226.4	224.8
No. 32565 层云降水	0.74	0.20	263.5	229.2	227.2
No. 60407 云砧	0	0	209.0	204.5	203.6
No. 60407 对流降水	0	0	215.8	210.0	208.8
No. 60407 层云降水	0	0	235.6	231.6	230.2
No. 60696 云砧	0.82	0.21	264.8	203.6	200.3
No. 60696 对流降水	0.45	0.20	268.4	214.0	210.9
No. 60696 层云降水	0.60	0.20	266.8	213.5	210.6
No. 61003 云砧	0	0	209.8	206.5	205.5
No. 61003 对流降水	0	0	207.5	201.8	200.9
No. 61003 层云降水	0	0	219.0	215.0	214.0

和层云降水具有更大的反射率(见 VIRS ch1),层云降水云顶的反射率次之(分别为 0.74 和 0.60),而对流降水云顶反射率较小(分别为 0.71 和 0.45),对照表中 VIRS ch2 反射率(均小于 0.23)可知,云砧顶部云粒子尺度小且光学厚度较大,而对流降水云顶附近的云粒子尺度相对较大(因为对流云中存在气流将大粒子上抛的缘故);VIRS ch3 主要表现了该通道对白天和夜晚的敏感,但还可以看到云砧多表现为较低亮温(第4个例外)。云砧在 VIRS 的 ch4 和 ch5 通道均表现了低亮温特点,且均比对流降水亮温低 5 K 左右,而比层云降水亮温低近 10 K,说明云砧顶部高度最高,而层云降水云顶最低,这些特征均合理,进一步证实确定型“其他”类型降水为积雨云云砧的结论。

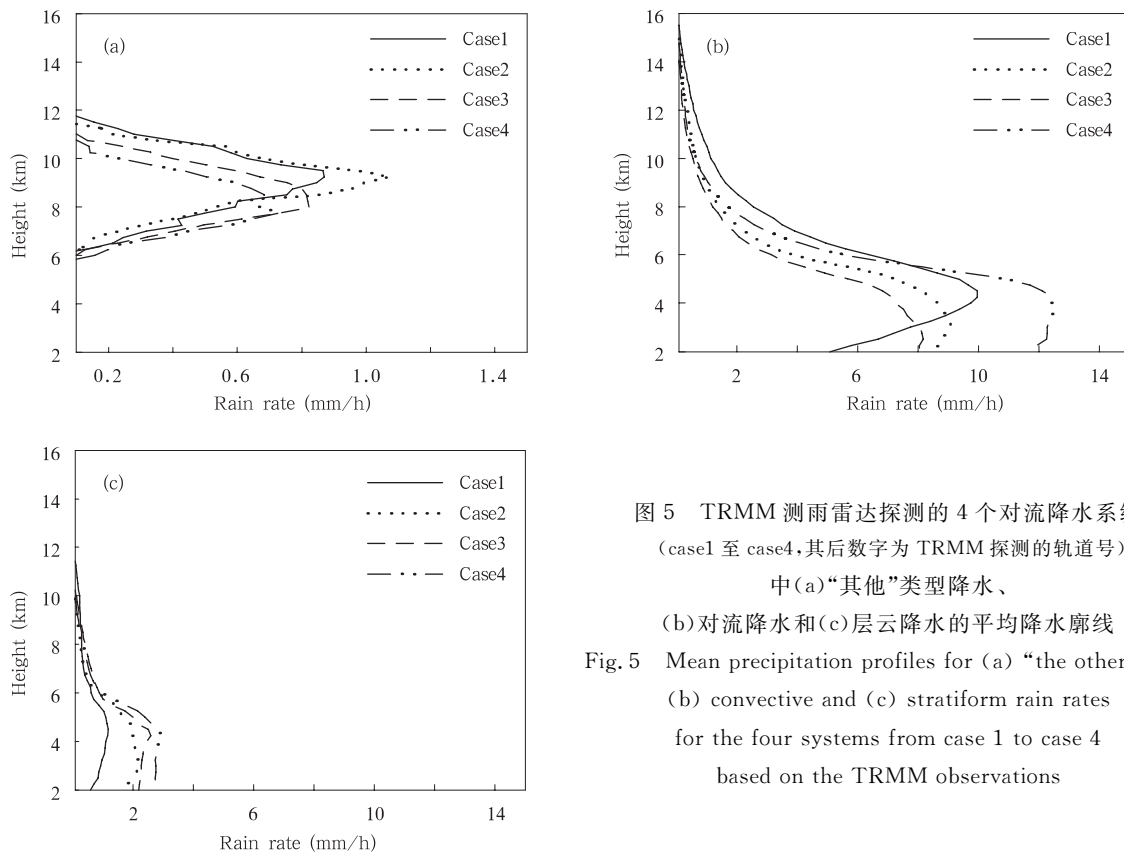


图5 TRMM 测雨雷达探测的 4 个对流降水系统 (case1 至 case4, 其后数字为 TRMM 探测的轨道号) 中(a)“其他”类型降水、(b)对流降水和(c)层云降水的平均降水廓线
Fig. 5 Mean precipitation profiles for (a) “the others”, (b) convective and (c) stratiform rain rates for the four systems from case 1 to case 4 based on the TRMM observations

3.2 统计分析

根据个例分析结果,我们以 5 km 高度上下层累计降水率 1 mm/h 为界,将“其他”类型降水廓线分为 4 种情况:5 km 上下累计降水率均大于 1 mm/h(样本 287920)、5 km 上下累计降水率均小于 1 mm/h(样本 25)、5 km 以下累计降水率大于 1 mm/h(样本 38159)和 5 km 以上累计降水率大于 1 mm/h(样本 715720),分别代表整层气柱存在“其他”类型降水、整层气柱几乎不存在“其他”类型降水、雨顶高度小于冻结层高度的暖性“其他”类型降水和云砧。可见“其他”类型降水样本中,云砧样本占近 70%,但如果考虑到青藏高原上的“其他”类型降水可能是浅薄降水(Fu, et al, 2006),则云砧样本要稍有减小,因为高原 5 km 以下为陆地,5 km 以上累计降水率大于 1 mm/h 的“其他”类型降水不一定是积雨云的云砧。但结果已足以说明亚洲非高原地区夏季 TRMM 测雨雷达探测的“其他”类型降水的大部分是积雨云的云砧。此外,之所以有这样的定论,也是考虑到 TRMM 测雨雷达波长不具备

对一般卷云的探测能力,因为卷云含冰量少,一般不会被 TRMM 测雨雷达探测到;而积雨云云砧(特别是靠近积雨云云体附近的云砧)中含冰量应足以形成 TRMM 测雨雷达回波。

夏季亚洲积雨云云砧样本占“其他”类型降水样本比例的空间分布(图 6)表明,夏季陆地“其他”类型降水中积雨云云砧所占比例在 60%—90%,而洋面云砧的比例为 50%—80%,可见 TRMM 测雨雷达对积雨云云砧具有较高的识别能力。

为了揭示夏季亚洲积雨云云砧出现频次的分布,我们计算了格点(0.5°×0.5°)内云砧出现次数与格点内 TRMM 测雨雷达总探测次数(非降水的探测次数与降水的探测次数之和)的比值,该比值即统计学意义上格点的云砧出现频次。积雨云云砧出现频次的空间分布(图 7)表明,亚洲夏季积雨云云砧出现频次变化于 0.1%—0.4%,它比对流降水频次(傅云飞等,2008)小一个量级。由于这里统计的次数是测雨雷达探测的像素(面积可视为直径约 4.5 km 的圆面积),因此可认为积雨云云砧面积占

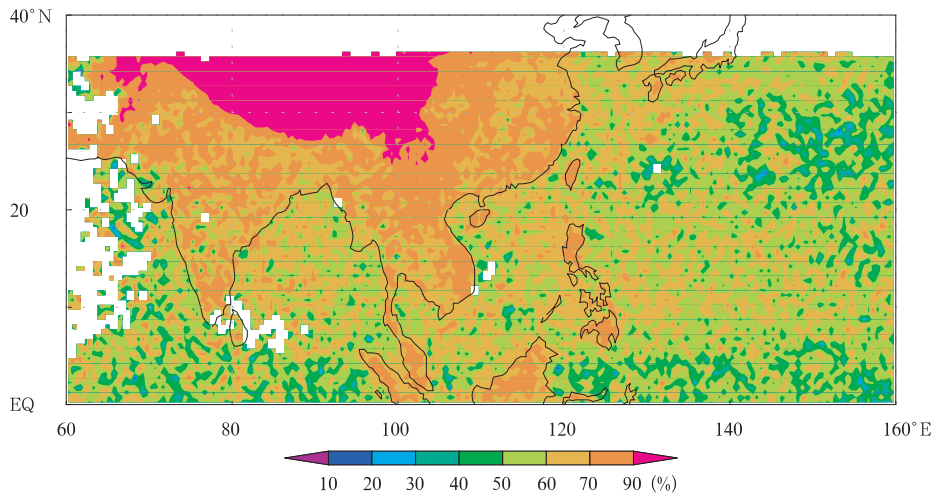


图6 夏季亚洲积雨云云砧样本占“其他”类型降水样本比例的空间分布
Fig. 6 Ratio distribution of the cumulonimbus incus samples to the total samples of the “others” in summer Asia

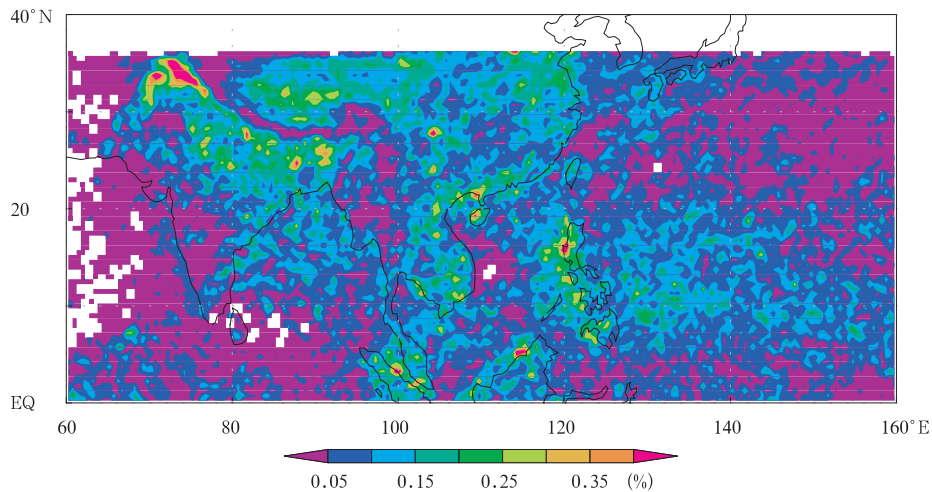


图7 10年夏季亚洲积雨云云砧出现频次的空间分布
Fig. 7 Occurring frequency spatial distribution of the cumulonimbus incus in summer Asia for the ten years

对流降水面积的十分之一,但是,考虑到 TRMM 测雨雷达的波长 2.2 cm 对含冰量小的云砧探测能力有限,夏季亚洲实际积雨云云砧出现频次应比这个比例高。图 7 还表明夏季亚洲存在 6 个积雨云云砧高发区,它们分别位于印度次大陆北部至喜马拉雅南侧的地区、中国东部的江淮之间地区、中南半岛至中国广西和广东(包括海南及雷州半岛)、菲律宾及其两侧的南中国海、马来半岛至苏门答腊、加里曼丹。这 6 个区域的下垫面均为陆面,可见夏季亚洲陆面上易出现积雨云云砧。相对而言,洋面上的积

雨云云砧出现频次比陆面少。只有热带西太平洋暖池及孟加拉湾出现小于 0.3% 的云砧频次,因为夏季这里也发生近 3% 的对流降水频次(傅云飞等, 2008)。

现有的积雨云云砧垂直结构概念基本上是来自有限的区域试验,如从 Wallace 等(1977)的典型飚线对流降水剖面示意图中,我们大体上可以看到积雨云云砧的厚度约 2—3 km,其底部的高度约 10 km。很显然,这个结果具有局限性。在大范围区域甚至全球,积雨云云砧垂直结构的统计特征还

尚未知晓。为此,这里利用垂直剖面的方法,给出亚洲 10 年夏季平均的积雨云云砧降水率沿经向-高度、纬向-高度分布(图 8 和 9)和相应的均方差分布(图 10 和图 11),其中经向选择了 5°N、15°N、30°N,分别代表了热带、热带与副热带之间、副热带;纬向选择了 90°E、115°E、140°E,分别代表了自孟加拉湾至青藏高原、南中国海至中国大陆、西太平洋低纬至副热带。云砧降水率的经向-高度剖面图和纬向-高度剖面图表明:不论在热带还是副热带,积雨云云砧的平均厚度约 3—4 km;图 8 表明夏季副热带比热带云砧平均厚度稍厚 0.5 km(这一特征在图 9 中也很清楚);图 8a 中 100°E 以西和图 9c 中 30°N 以北为高原,其上的结构不应视为云砧(高原积雨云云砧结构正在研究之中);云砧底部平均高度在 6 km 左右,但副热带陆面较同纬度洋面稍偏高(图 8a 中

100°E 以东),25°N 以南地区的云砧底部平均高度较其北部稍偏高(图 9a 和 9b);测雨雷达给出的云砧顶部平均高度(第 1 个雷达回波高度,而非云的高度)为 11.5 km(副热带陆面,图 8a)、11 km(副热带洋面及副热带和热带之间,图 8a 和图 9)、10.5 km(热带,图 8c)。云砧降水率均方差的经向-高度剖面和纬向-高度剖面图表明:云砧的降水率在 6—12 km 的均方差最大,可达 0.5 mm/h,它约是云砧降水率的 50%;不论在热带还是副热带,均方差的最大厚度比平均云砧厚度约厚 1 km;在 12—16 km 也存在小于 0.5 mm/h 的均方差;由此可见云砧高度及其中的冰含量变化剧烈;图中的 6 km 以下出现的小于 0.15 mm/h 的降水率均方差,表明云砧下可存在的一些云或降水,这与实际相符。上述说明亚洲不同纬度地区、洋面和陆面对流降水有内在的

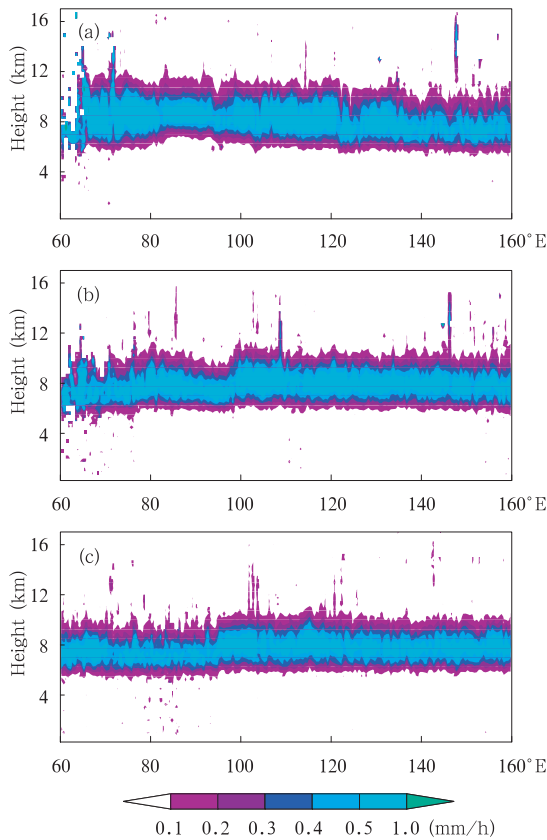


图 8 云砧廓线(即降水率廓线)沿 5°N(c)、15°N(b)、30°N(a)的经向高度平均分布
Fig. 8 Height-longitudinal cross-sections of rain rate (unit: mm/h) of the cumulonimbus incus along 30°N (a), 15°N (b) and 5°N (c) in summer Asia

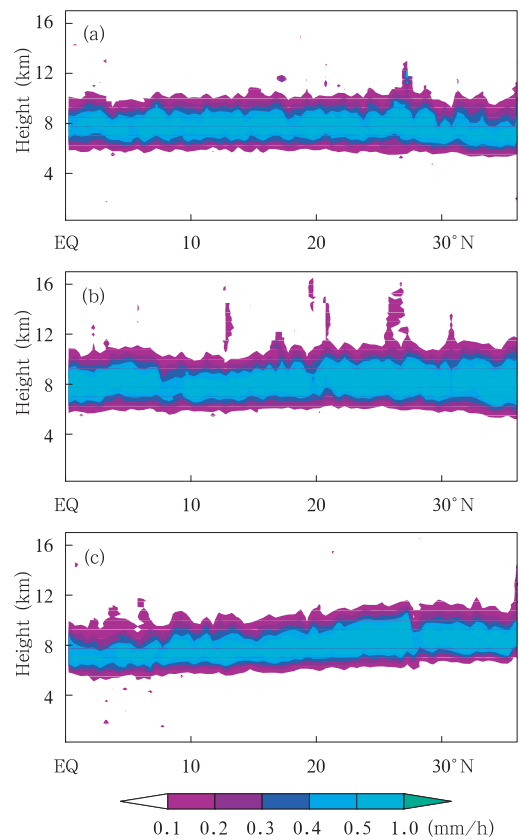


图 9 云砧廓线(即降水率廓线)沿 90°E(c)、115°E(b)、140°E(a)的纬向高度平均分布
Fig. 9 Height-latitude cross-sections of rain rate (unit: mm/h) of the cumulonimbus incus along 140°E (a), 115°E (b) and 90°E (c) in summer Asia

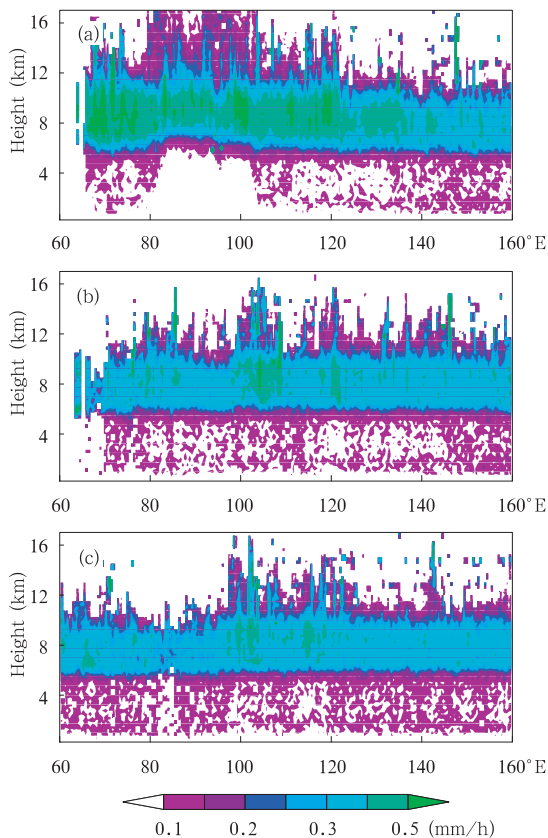


图 10 云砧廓线均方差沿 5°N (c)、 15°N (b)、 30°N (a) 的经向高度平均分布
Fig. 10 Height-longitudinal cross-sections of rain rate root mean square (unit: mm/h) of the cumulonimbus incus along 30°N (a), 15°N (b) and 5°N (c) in summer Asia

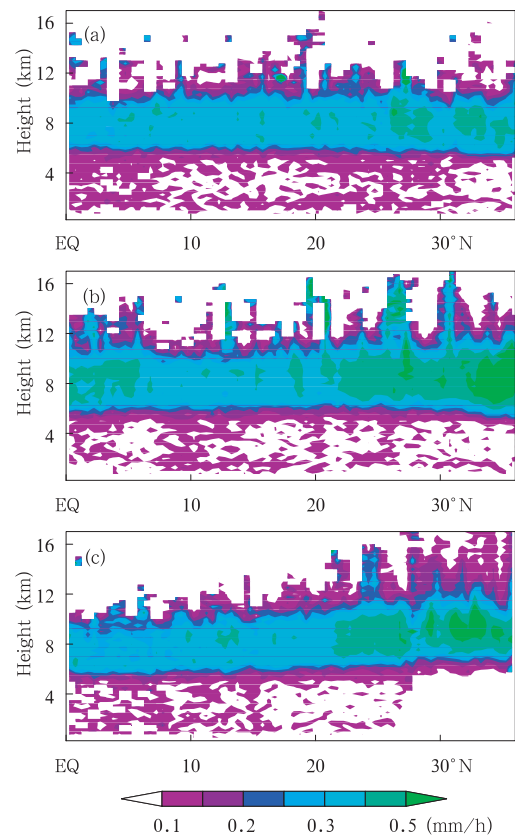


图 11 云砧廓线均方差沿 90°E (c)、 115°E (b)、 140°E (a) 的纬向高度平均分布
Fig. 11 Height-latitude cross-sections of rain rate root mean square (unit: mm/h) of the cumulonimbus incus along 140°E (a), 115°E (b) and 90°E (c) in summer Asia

差异,从而影响积云云砧的物理特性。

为进一步了解夏季亚洲积雨云云砧的物理特性在光谱上的表现,我们给出了 VIRS ch1 和 ch4 通道探测云砧的 10 年平均信号分布(图 12a 和 12d)。为对比起见,还给出了对流降水和层云降水云顶部的 ch1 和 ch4 通道 10 年平均信号(图 12)。从图中可见,青藏高原东部和东北部积雨云云砧的平均反射率多在 0.7—0.8,亚洲大部分地区的平均反射率多在 0.8—0.9,主要集中在中国东部大陆、南中国海北部至华南、菲律宾西侧的南中国海、青藏高原南侧至印度次大陆北部、孟加拉湾北部(图 12a),除中国东部大陆的远红外平均亮温偏高(约 220—240 K),上述地区相应的远红外平均亮温均低于 220 K,说明这些地区云砧顶部高度高、光学厚度大、云粒子尺度小,而中国东部大陆的云砧顶部高度比上述地区

的低。图 12 还表明虽然西太平洋暖池上空云砧的平均反射率为 0.8—0.9,但其远红外平均亮温变化于 210—230 K,说明该地区云砧顶部光学厚度大、云粒子小,但高度有较大的起伏,表明了西太平洋暖池对流活动复杂多变的特点。此外, 30° — 35°N 地区,除中国东部大陆外,该纬度带的其他地区平均反射率小于 0.8,亮温则变化于 230—270 K,说明这一纬度带纬向云砧存在较大的差别。

与云砧的平均反射率和远红外平均亮温相比,西太平洋地区、青藏高原南侧至印度次大陆的对流降水和层云降水云顶部平均反射率(0.6—0.7)要小 0.1 左右、平均亮温(220—250 K)要高 10 K 以上,再次说明这两地区云砧大、云顶高、云粒子小的特点;在亚洲的其他地区(高原除外),对流降水和层云降水云顶部平均反射率也比云砧的小,均在 0.6—

0.8,且平均亮温却要比云砧高10 K以上,如孟加拉湾西北部、南海中部至北部湾的对流降水云和层云降水云顶平均亮温为220—230 K,但这些地区的云砧平均亮温却低于220 K,又如中国东部大陆的对流降水和层云降水云顶平均亮温为230—250 K,但该地区的云砧平均亮温却低于230 K。

综上所述,积雨云云砧平均反射率最高,远红外平均亮温最低;对流降水云和层云降水云的云顶平

均反射率低,两者的远红外平均亮温却相当,但都比云砧的平均反射率小、平均亮温高。由此可大体推测亚洲降水云的演变过程:一方面强对流降水云上方强烈的出流产生云砧,云砧顶部云粒子小、光学厚度大,且云顶很高;另一方面,随着对流降水云内的上升气流减弱,对流降水云将衰退产生层云降水云,因此,这两种降水云顶部的云粒子尺度和云高度大体相当。

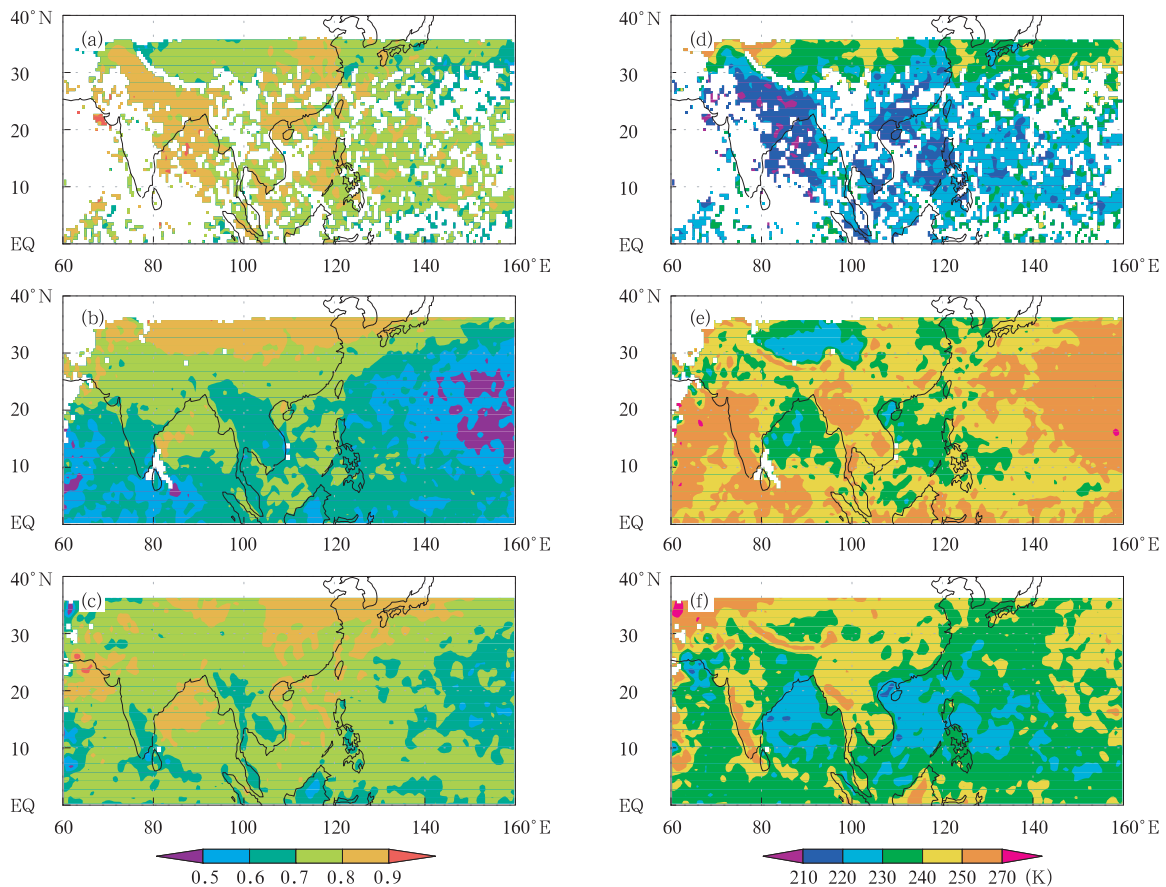


图12 VIRS ch1和ch4通道探测云砧、对流降水云、层云降水云的10年夏季平均反射率(a、b、c)和平均亮温(d、e、f)分布

Fig. 12 Distributions of the mean reflectivity (a、b、c) and mean infrared brightness temperature (d、e、f) for the incus, convective precipitating clouds and stratiform precipitating clouds in summer from 1998 to 2007, as detected by VIRS at ch1 and ch4

4 结论和讨论

到目前为止,热带测雨卫星(TRMM)标准资料2A25中的第3类降水(“其他”类型降水)的性质及特点尚不清楚。针对这一问题,本文首先通过个例分析发现,“其他”类型降水分布在对流降水系统云

团的外围,似乎是积雨云云砧。为了证实这一猜测,随后对“其他”类型降水廓线及其云顶的可见光发射率和远红外亮温进行了分析,并与对流降水和层云降水进行了对比。结果表明“其他”类型降水的平均廓线表现了积雨云云砧特征,即廓线峰值(约0.6—1.0 mm/h)高度位于8—10 km,而在这个层

次上下的降水率很小(小于 0.3 mm/h);云砧顶部的可见光和红外信号也表现清楚,即表现了比对流和层云降水更大的反射率和更低红外亮温。

根据个例中积雨云云砧廓线特点,本文定义 5 km以上各层累计降水率大于 1 mm/h 为云砧廓线,对亚洲夏季积雨云云砧样本进行了统计,结果表明该地区夏季云砧样本接近“其他”类型降水样本总数的 70%,由此可知,TRMM 测雨雷达探测的“其他”类型降水多为积雨云云砧。

随后,本文针对亚洲地区的积雨云云砧出现概率、垂直结构及云顶反射率和远红外亮温进行了统计计算。结果显示夏季亚洲云砧出现频次为 0.1%—0.4%,它至少是 TRMM 测雨雷达测得对流降水频次的十分之一以上;结果还显示夏季亚洲积雨云云砧频次陆面多于洋面;积雨云云砧的垂直结构表明,其平均厚度约 3—4 km;副热带云砧稍比热带厚;云砧底部平均高度在 6 km 左右,但副热带陆面较同纬度洋面稍偏高、25°N 以南地区较其北部稍偏高;副热带陆面的云砧顶部平均高度最高,达 11.5 km,副热带洋面及副热带和热带之间、热带的云砧顶部平均高度分别为 11、10.5 km。卫星探测的反射率和远红外亮温表明,亚洲大部分地区的积雨云云砧平均反射率最高(0.8—0.9),平均远红外平均亮温最低(低于 220 K),而对流降水云和层云降水云的云顶平均反射率比云砧小,但平均亮温却高。

由于 TRMM 测雨雷达的波长 2.2 cm 对含冰量小的云砧探测能力有限,因此,夏季亚洲实际积雨云云砧出现频次、云砧厚度和高度要比本文给出的高。

致谢:日本国家空间发展署(JAXA)的地球观测研究中心(EORC)为本研究提供了 TRMM PR 资料(项目 IP: 206),在此表示感谢。

参考文献

傅云飞,冯静夷,朱红芳等. 2005. 西太平洋副热带高压下热对流降水结构特征的个例分析. 气象学报, 63(5): 750-761

傅云飞,宇如聪,徐幼平等. 2003. TRMM 测雨雷达和微波成像仪对两个中尺度特大暴雨降水结构的观测分析研. 气象学报, 61(4): 421-431

傅云飞,张爱民,刘勇等. 2008. 基于星载测雨雷达探测的亚洲对流和层云降水季尺度特征分析. 气象学报, 66(5): 730-746

何文英,陈洪滨. 2006. TRMM 卫星对一次冰雹降水过程的观测分析研究. 气象学报, 64(3): 364-376

李锐,傅云飞,赵萍. 2005. 热带测雨卫星的测雨雷达对 97/98 年 EL Nino 后期热带太平洋降水结构的研究, 大气科学, 29(2): 225-235

刘奇,傅云飞. 2007. 基于 TRMM/TMI 的亚洲夏季降水研究. 中国科学 D 辑, 37(1): 111-122

姚展予,李万彪,朱元竞等. 2003. 用 TRMM/TMI 估算 HUBEX 试验区的云中液态水. 气象学报, 61(1): 116-121

郑媛媛,傅云飞,刘勇等. 2004. 热带降水测量卫星对淮河一次暴雨降水结构与闪电活动的研究. 气象学报, 62(6): 790-802

Awaka J, Iguchi T, Okamoto K. 1998. Early results on rain type classification by the Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) precipitation radar. Pro. 8th URSI commission F Open Symp, Averbier, Portugal, 134-146

Bhatt B C, Nakamura K. 2005. Characteristics of monsoon rainfall around the himalayas revealed by TRMM precipitation radar, Mon Wea Rev, 133(1): 149-165

Fu Y, Liu G. 2003. Precipitations in mid-latitude East Asia as observed by TRMM PR and TMI. J Meteor Soc Japan, 81(6): 1353-1369

Fu Y, Liu G, Wu G, et al. 2006. Tower mast of precipitation over the central Tibetan Plateau summer. J Geophys Res Lett, 33, L05802, doi: 10. 1029/2005GL04713

Fu Y, Liu G. 2007. Possible misidentification of rain type by TRMM PR over Tibetan plateau. J Appl Meteor, 46(5): 667-672

Houze R A. 1997. Stratiform precipitation in regions of convection: a meteorological paradox? Bull Amer Meteor Soc, 78(10): 2179-2196

Kummerow C, Barnes W, Kozu T. 1998. The tropical rainfall measuring mission (TRMM) sensor package. J Atmos Oceanic Tech, 15: 809-817

Liu G, Fu Y. 2001. The Characteristics of Tropical Precipitation Profiles as Inferred from Satellite Radar Measurements. J Meteor Soc, Japan, 79(1): 131-143

Schumacher C, Houze Jr R A. 2003. The TRMM precipitation radar's view of shallow, Isolated Rain. J Appl Meteor, 42(10): 1519-1524

Steiner M, Houze Jr R A, Yuter S E. 1995. Climatological characterization of three-dimensional storm structure from operational radar and rain gauge data. J Appl Meteor, 34:1978-2007

Wallace J M, Hobbs P V. 1977. Atmospheric Science: An Introductory Survey. New York: Academic Press, 467pp

Yang S, Smith Eric A. 2006. Mechanisms for diurnal variability of global tropical rainfall observed from TRMM. J Clim, 19(20): 5190-5226