

基于 TRMM 卫星探测对宜宾夏季 两次暴雨过程的比较分析^{* 1}

李德俊^{1,2} 李跃清¹ 柳 草³ 林 莉⁴
LI Dejun^{1,2} LI Yueqing¹ LIU Cao³ LIN Li⁴

1. 中国气象局成都高原气象研究所, 成都, 610072
2. 湖北省人工影响天气办公室, 武汉, 430074
3. 武汉中心气象台, 武汉, 430074
4. 成都信息工程学院, 成都, 610225

1. *Institute of Plateau Meteorology, CMA, Chengdu 610072, China*
2. *Weather Modification Office of Hubei Province, Wuhan 430074, China*
3. *Wuhan Central Meteorological Observatory, Wuhan 430074, China*
4. *Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China*

2008-05-13 收稿, 2009-05-22 改回.

Li Dejun, Li Yueqing, Liu Cao, Lin Li. 2010. Comparative analysis between two summer heavy rain events in Yibin based on the TRMM data. *Acta Meteorologica Sinica*, 68(4):559-568

Abstract Using the observational data from the TRMM satellite and Doppler radar at Yibin, the Vertical Wind Profile (VWP) change characteristics, rainfall structure characteristics and rainfall profiles for the two regional heavy rain events in Yibin in 2007 are analyzed in this paper. The results show that: (1) The two precipitations are all caused by mesoscale systems as indicated by their respective horizontal rainfall pattern, and although the rainfall intensity and scope of the event occurred in July are much larger than those of the event in August, their vertical structure implies a severe convective cloud cluster developed therein with its cloud top height up to 17, 14 km; (2) the difference between the two profiles of stratus precipitation rate is not distinct with the trend of precipitation intensity was reduced with increasing height, while their convective precipitation rate profiles are quite different from each other with the shifting direction of precipitation growth areas being just opposite; for the former event the area is shifted from coagulation layer to mixed layer and for the latter it is from mixed layer to coagulation layer; (3) the typical vertical circulation structure of convergence in lower levels and divergence in upper levels is found over the heavy/torrential rain areas in the “July-event” based on the VWP data with the precipitation cloud clusters moving continuously, but there exists no such a typical structure with the “August event” in which the alternative warm or cold advection occurs in the case of easterly waves coming and the activity of rainfall is discontinuous.

Key words TRMM satellite, Rainfall structure, Rainfall profile, Radar wind profile

摘 要 利用 TRMM 卫星和宜宾多普勒雷达探测结果, 比较分析了 2007 年夏季在宜宾发生的“2007. 07. 09”和“2007. 08. 23—25”两次区域性暴雨过程降水云团的水平和垂直结构变化特征、降水云团风廓线变化特征, 结果表明: (1) 这两次暴雨过程降水水平结构均为中尺度对流降水系统, 但“2007. 07. 09”暴雨过程比“2007. 08. 23—25”的降水强度和范围要大得多, 且垂直结构表现为强对流性降水云团的云顶高度分别达 17、14 km; (2) 两次过程的层云降水率廓线差异并不大, 随高度增加, 降水强

* 资助课题: 成都区域气象中心项目“西南区域数值预报发展与业务系统建议”, 中国气象局数值模式创新基地科研业务项目“青藏高原东部及下游关键区大气边界层科学试验前期预研究”。

作者简介: 李德俊, 主要从事多普勒雷达与卫星资料处理与分析方面的研究。E-mail: esldj@163.com

度呈减小趋势,而它们的对流降水率廓线差异较大,降水增长区分别由碰并层向冰水混合层转移和由冰水混合层向碰并层转移的趋势;(3)雷达风廓线上,发现“2007.07.09”大暴雨区存在低层辐合高层辐散的典型垂直环流结构,减弱时降水云团的高度有所下降,且在垂直方向上降水云团活动均为连续的,而发现“2007.08.23—25”东风波过来时有冷暖平流的一个变化情况,且降水云团活动是时断时续的。

关键词 TRMM 卫星,降水结构,降水廓线,雷达风廓线

中图法分类号 P407.2

1 引言

夏季青藏高原东侧的四川盆地受到西南低涡和南海西行台风的影响,极易发生暴雨、大暴雨乃至特大暴雨天气。已有研究表明(秦剑等,1997;朱禾等,2002;陈忠明等,2002),影响该区域暴雨的天气系统主要有西南低涡、冷锋、切变线、南海西行台风等,由西南低涡影响造成盆地发生大到暴雨甚至特大暴雨就占了相当大的比例,四川盆地受南海西行台风影响的次数较少,但也常常会引起暴雨。这些研究主要集中在天气学诊断分析、数值模拟和气候统计方面,对西南低涡和南海西行台风引起四川盆地暴雨的降水云团风廓线变化特征,降水结构等方面的研究还不太多。

近些年来,TRMM 卫星资料已经被广泛用来研究低纬地区(35°S—35°N)的降雨特征(Schumacher, et al, 2003; Liu, et al, 2001; Short, et al, 2001; 姚展予等, 2002; 何文英等, 2006; 吴庆梅等, 2003; Jin, et al, 2003; 程明虎等, 2004)。傅云飞等(2003, 2005, 2006, 2007)用 TRMM 的测雨雷达(PR)资料研究东亚地区降水的季节性变化特征,并用测雨雷达(PR)和微波成像仪(TMI)资料结合分析中国江淮地区的两个暴雨过程,后来又利用 TRMM/PR 资料分析了青藏高原中部夏季降水在经向剖面和纬向剖面上表现的塔檐结构,并详细分析了使用传统方法来确定青藏高原降水类型明显存在不足的地方。何会中等(2006)用 TRMM 资料详细研究了鲸鱼台风降水和水粒子空间分布的三维结构特征。郑媛媛等(2004)用 TRMM 卫星资料对淮河一次暴雨的降水结构与闪电活动进行了研究。刘奇等(2007)利用 TRMM/TMI 的资料,首次借助卫星遥感对夏季青藏高原地区的潜热水平分布形式、垂直结构及其变化特征进行了分析。此外,通过 TRMM 卫星探测信息来分析强对流降水的潜热变化特征和降水的结构特征,可在一定程度上反映出强降水云团的性质和所处的

状态,云团的热力和动力结构,以及云团中降水的微物理性质(Hobbs, 1989; Zipser, 1994)。

本文使用 TRMM 卫星的观测资料以及宜宾雷达风廓线资料对宜宾夏季发生的 2007 年 7 月 9 日(2007.07.09)和 2007 年 8 月 23—25 日(2007.08.23—25)两次区域性暴雨过程中降水云团的水平和垂直结构变化特征、降水云团风廓线变化特征进行比较分析,从而找出西南低涡和南海西行台风导致川南发生的暴雨在降水结构和风廓线上的共同特征和差异,以及这些特征的演变情况。

2 暴雨概况和天气形势

2007 年 7 月 8 日 20 时—9 日 20 时和 8 月 23 日 20 时—25 日 20 时宜宾均出现了区域性暴雨天气过程(图 1)。“2007.07.09”暴雨天气过程为连续性降水,有 28 站出现暴雨,其中 3 站达大暴雨,分别为南溪(182.6 mm)、红桥(131.8 mm)和宜宾县(114.7 mm);2 站达特大暴雨,分别为孔滩(315.2 mm)、铁清(287.1 mm),降水中心出现在宜宾中北部的宜宾县和孔滩,东部的红桥和南溪。“2007.08.23—25”暴雨天气过程中,降水不连续,且时大时小。3 d 的降水过程中有 32 站雨量大于 50 mm,其中 12 站雨量大于 100 mm,降水中心在宜宾中西部的屏山县、珙县和筠连县。

2007 年 7 月 7 日 08 时到 10 日 08 时,在川西北地区对流层低空始终有西南低涡活动,正涡度深厚。高空为强大的南亚高压控制,高层负涡度强度强、范围大,在特大暴雨期间存在低层辐合高层辐散的暴雨典型结构(图略)。8 日 20 时西南低涡南压,范围扩大(图 2),在川南下起了暴雨。“2007.08.23—25”暴雨过程是受圣帕台风登陆后东风波的影响,23 日 20 时东风波开始进入四川盆地,24 日 02 时东风波与南部暖低压共同影响川东和川南地区,24 日 08 时东风波继续向川南延伸加强,在宜宾下起了暴雨(图 3)。

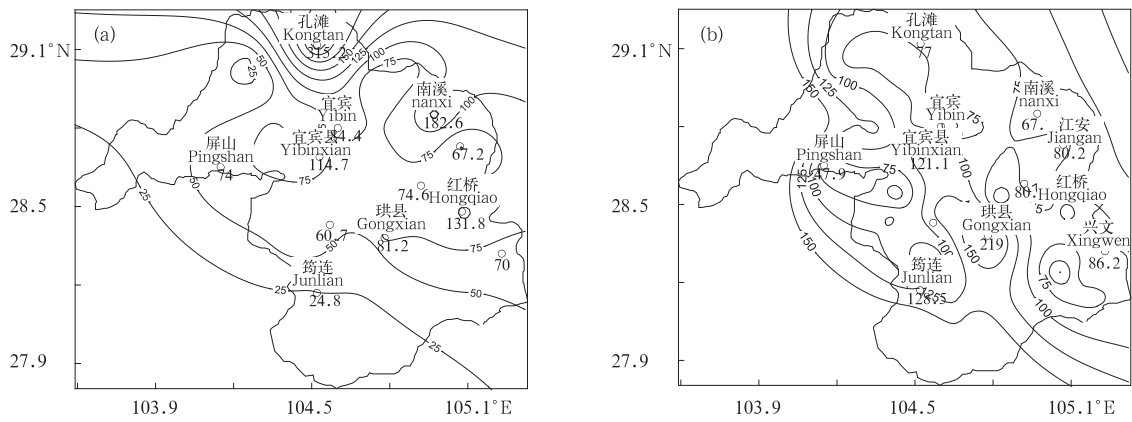


图 1 2007 年 7 月两次暴雨过程的雨量分布

(a. 8 日 20 时—9 日 20 时, b. 8 月 23 日 20 时—25 日 20 时;北京时)

Fig. 1 Total rainfalls during the two regional heavy rain events in Yibin

(a. from 20:00 BT 8 July to 20:00 BT 9 July 2007, b. from 20:00 BT 23 August to 20:00 BT 25 August 2007)

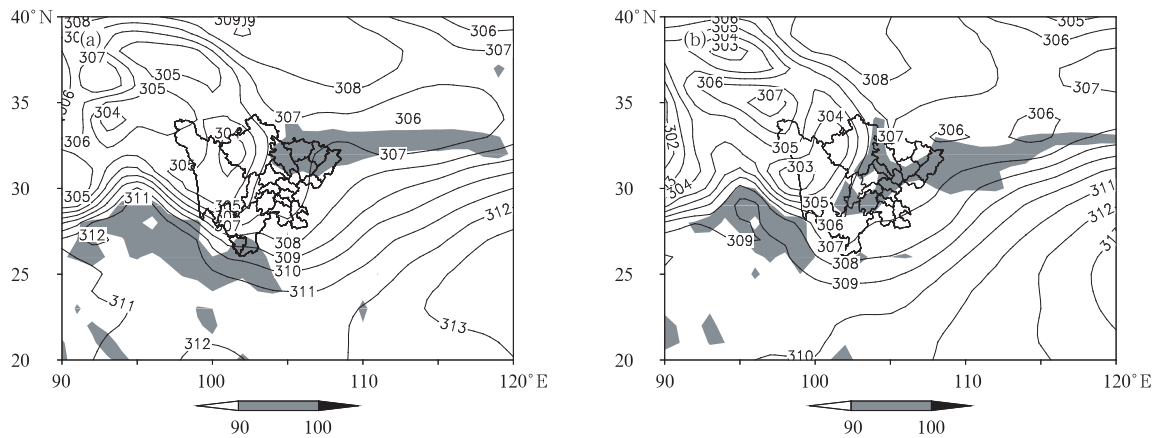


图 2 2007 年 7 月 8 日 14 时(a)、20 时(b) 700 hPa 位势高度(dagpm)及比湿(阴影区 $\geq 90\%$)

Fig. 2 Height (solid line, unit : dagpm) and humidity

(the areas with humidity $\geq 90\%$ are shaded) fields at 700 hPa (a. at 14:00 BT, b. at 20:00 BT 8 July 2007)

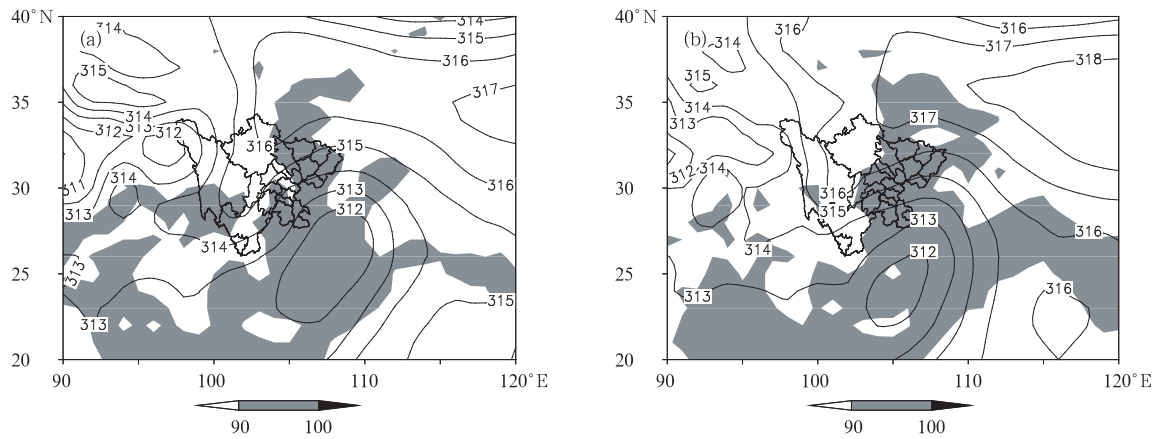


图 3 2007 年 8 月 24 日 02 时(a)、08 时(b) 700 hPa 位势高度(dagpm)及比湿(阴影区 $\geq 90\%$)

Fig. 3 As in Fig. 2 but for "a. at 02:00 BT 23, b. at 08:00 BT 24 August 2007"

3 资料

(1) TRMM 卫星资料

TRMM 卫星搭载的 PR、TMI 和 VIRS 是基本测雨仪器。本文用到的是 PR 第 2 级产品 2A25, 它可以提供降水类型和降水率的垂直廓线等其他资料。在“2007. 07. 09”宜宾暴雨天气过程中, TRMM 卫星探测到了 2 个时次的资料, 这两个时次为 2007 年 7 月 9 日 08 时 44 分 34 秒和 2007 年 7 月 9 日 13 时 38 分 19 秒(均为北京时, 以下均同), 分别记为 A、B 时刻。这 2 个时刻正好对应着“2007. 07. 09”暴雨第 2 次降水集中时段(9 日 05—14 时)的降水发展旺盛阶段以及降水减弱阶段(以宜宾、孔滩、南溪和红桥 4 站为例, 图 4)。在“2007. 08. 23—25”区域性暴雨天气过程中, TRMM 卫星共有 5 个

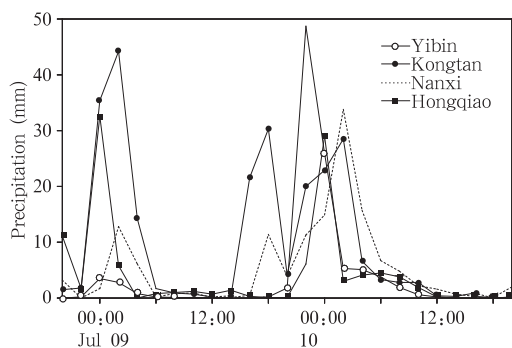
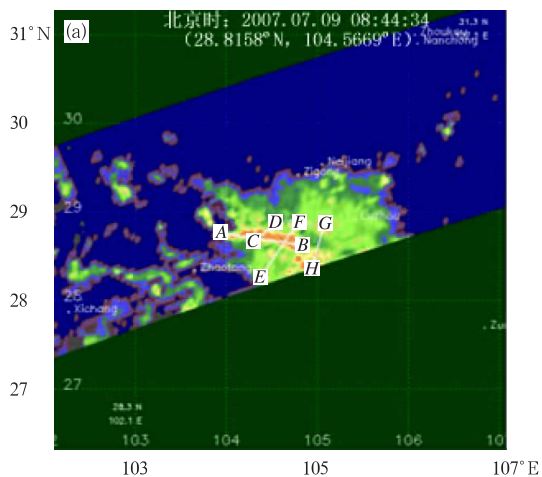


图 4 2007 年 7 月 8 日 20 时—9 日 20 时
每小时雨量

Fig. 4 Hourly precipitation during the period of 20:00 8—20:00 BT 9 July 2007



时次的资料, 分别为 8 月 23 日 09 时 37 分 35 秒、8 月 24 日 08 时 41 分 51 秒和 13 时 35 分 27 秒(降水发展旺盛阶段), 以及 8 月 25 日 09 时 23 分 42 秒和 14 时 17 分 20 秒(降水减弱阶段), 分别记为 C、D、E、F、G 时刻。本文重点分析“2007. 07. 09”和“2007. 08. 23—25”暴雨过程中分别处于降水发展旺盛阶段的 A、D 时刻和降水减弱阶段的 B、G 时刻。

(2) 宜宾雷达资料

本文用到了 2007 年 7 月 8 日 20 时—10 日 20 时和 8 月 23 日 20 时—25 日 20 时宜宾多普勒雷达风廓线资料。

4 结果

4.1 降水的水平结构

考虑到宜宾附近地区海拔较高, 4 km 高度以下地表对 PR 回波会造成干扰, 选取 4.5 km 高度做出降水率的水平分布, 时间方面分别选取了处于旺盛阶段的 A、D 时刻和减弱阶段的 B、G 时刻(图 5 和 6)。从图 5 中可以看出, 发展旺盛阶段它们相同之处均是中尺度降水系统, 可以看到降水系统由一个主降水云团和几个零散的降水云团组成, 不同之处, “2007. 07. 09”降水水平范围比“2007. 08. 23—25”要大, A 时刻主降水云团的水平范围大约 200 km, D 时刻主降水云团的水平范围大约 100 km。从图 6 中可以看出, 减弱阶段 B 时刻还保持着大块的降水云团, G 时刻则只剩下零星的降水云团, 减弱阶段降水强度和范围比强盛阶段都有所减弱。

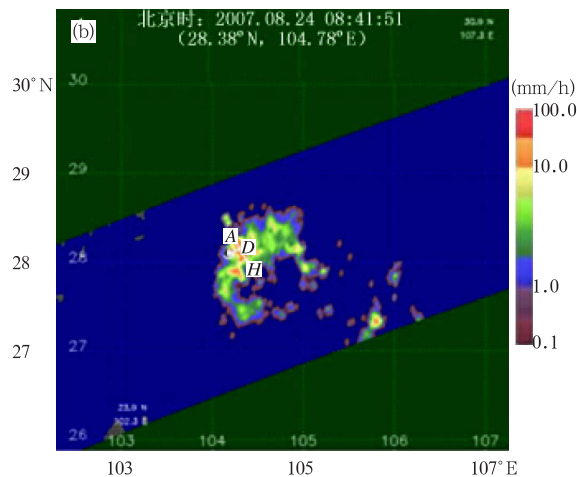


图 5 发展旺盛阶段 4.5 km 高度处降水率的水平分布(a. A 时刻, b. D 时刻)

Fig. 5 Rainfall rate at the 4.5 km height at the stage of development (a. A time, b. D time)

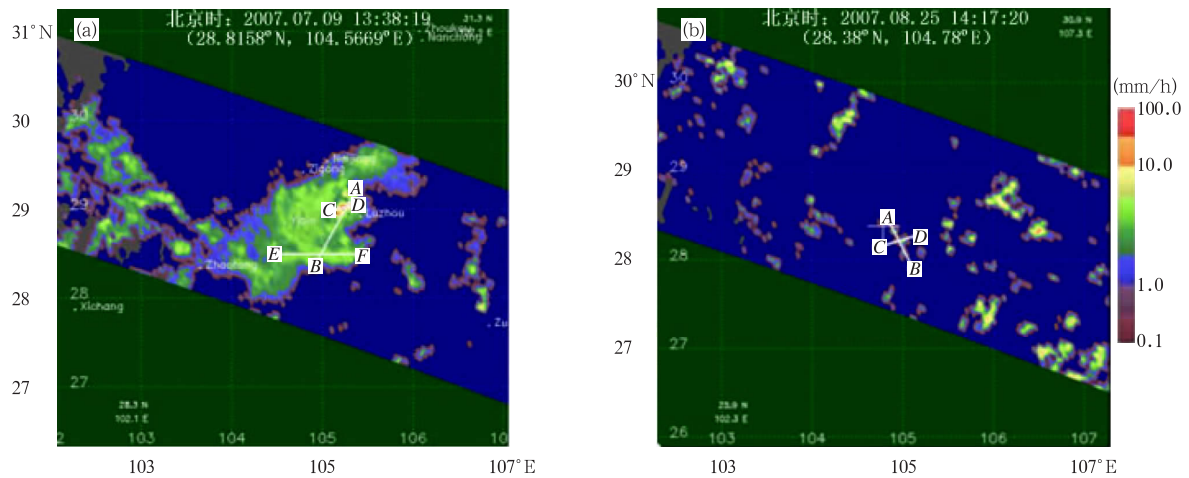


图 6 减弱阶段 4.5 km 高度处降水率的水平分布(a. B 时刻, b. G 时刻)
Fig. 6 As in Fig. 5 but for the stage of decay and (a. B time, b. G time)

4.2 降水的垂直结构

对发展旺盛阶段 A、D 时刻,减弱阶段 B、G 时刻的降水云团作垂直剖面。从图 7 可以看出发展旺盛阶段,“2007. 07. 09”强对流降水的云顶高度可达 17 km,此高度远远超过了一般对流云的高度,这是由于云中上升气流很强,云体被抬升的很高。而“2007. 08. 23—25”强对流降水的云顶高度相对矮一些,约为 11 km,表明对流没有前者那么旺盛。另外二者云中降水强度随高度都呈非均匀分布,最大降水强度出现在 6 km 高度以下的对流层中低层;从图 8 可以看出减弱阶段,“2007. 07. 09”对流降水的云顶也可达 14 km 左右的高度,而“2007. 08. 23—25”最高只有 7 km,降水强度随高度分布相对发展旺盛阶段也要均匀一些。从图 7 和图 8 可以看出,层云的降水强度小于 10 mm/h。

4.3 降水率廓线分布

TRMM/PR 实测的降水率廓线各有区别,但 Liu(2001)和 Fu(2001)利用主成分分析方法对降水廓线进行统计分析,结果揭示第一主分量在热带地区可解释总方差的 80%以上,且其重建廓线与平均廓线甚为相似,表明平均降水廓线具有很好的代表性。这为我们利用平均廓线进行降水垂直结构研究提供了理论依据。平均廓线获取法:找到地面雨强在 1 mm/h 附近的(±0.5 mm/h 范围内)的所有降水点,对这些点垂直方向上各层对应的降水强度分别求平均,做出平均降水廓线。依据这个方法,再分别做出地面雨强分别为 5、10、15、20、25、30 和 35 mm/h 的平均降水廓线。分析廓线时检查了宜宾当地两次过程的探空曲线,“2007. 07. 09”过程中的 0、-10 和 -20°C 温度层平均高度分别为 5. 8、

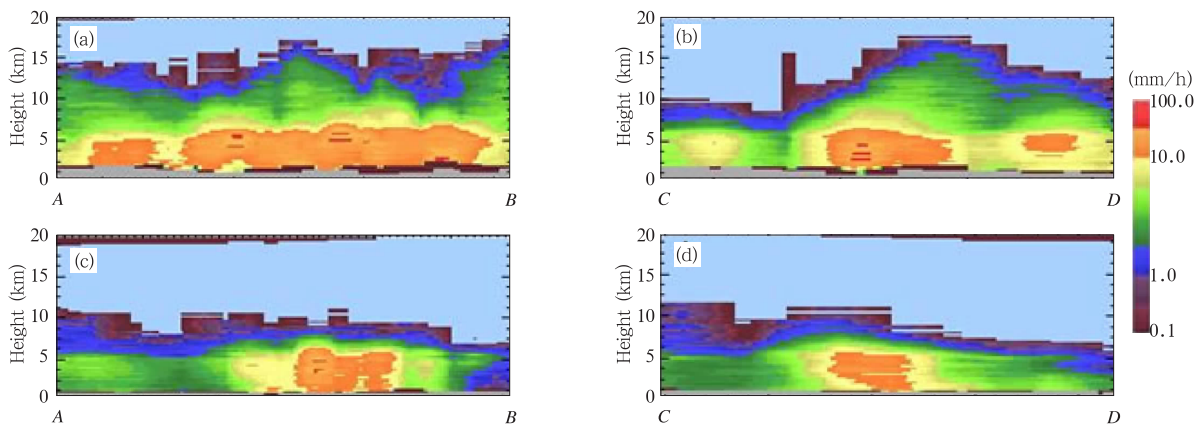


图 7 发展旺盛阶段 A、D 时刻降水垂直剖面(所作剖面水平位置见图 5)(a、b)A 时刻,(c、d)D 时刻
Fig. 7 Rainfall cross-section at the stage of development along the horizontal positions shown in Fig. 5 (a./b. A time, c./d. D time)

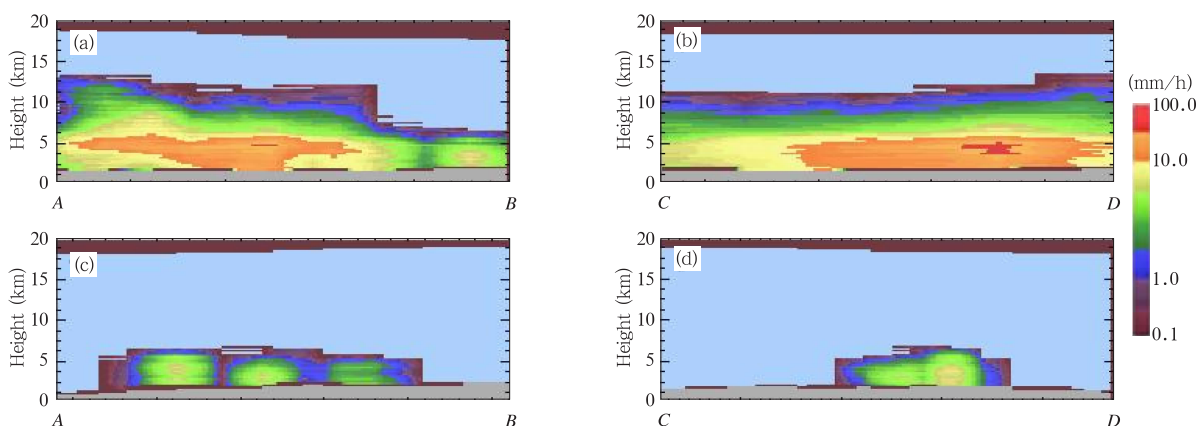


图8 减弱阶段B、G时刻降水垂直剖面(所作剖面水平位置见图6)(a,b) B时刻,(c,d) G时刻

Fig. 8 As in Fig. 7 but for the stage of decay and (a./b. B time, c./d. G time)

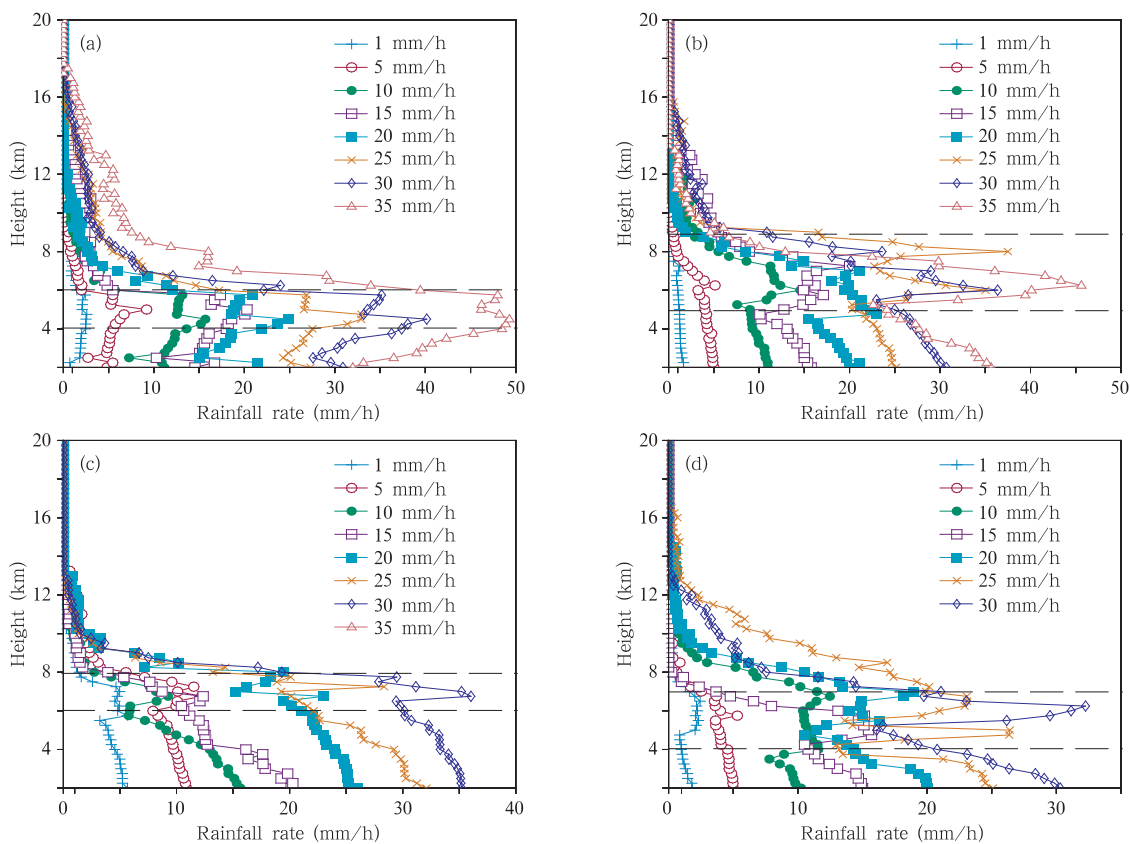


图9 对流降水率廓线 (a. A时刻,b. D时刻,c. B时刻,d. G时刻)

Fig. 9 Convective rainfall profiles (a. A time, b. D time, c. B time, d. G time)

7.6 和 9.2 km,而“2007. 08. 23—25”过程的分别为 5.2,7.1 和 8.8 km(图略)。为了对比分析两次暴雨过程中降水强度随高度变化的情况,这里给出了两次过程中 A、B、D 和 G 时刻的对流降水率廓线(图9)和层云降水率廓线(图10)。

从图9看出“2007. 07. 09”的 A 时刻对流降水率廓线2—6 km 出现明显的增雨现象,说明6 km 以下存在强烈的雨滴碰并增长过程,6 km 以上迅速减小。当到 B 时刻时,虽然与 A 时刻相隔 427 min,但可以看到它的变化趋势,2—6 km 呈减少趋势,

7—8 km 呈增加趋势,8 km 以上呈迅速减少趋势,说明增长区由碰并层向冰水混合层转移。而“2007. 08. 23—25”的 *D* 时刻对流降水率廓线 2—5 km 呈减小趋势,5—8 km 呈增大趋势,8 km 以上呈迅速减小趋势;*G* 时刻 2—4 km 呈减小趋势,4—7 km 呈增加趋势,7 km 以上呈减小趋势,说明增长区由冰水混合层向碰并层转移。

从图 10 看出两次过程的层云降水廓线差异并不

大,随高度增加,降水强度呈减小趋势,发展旺盛阶段约在 6—8 km 减小最快,减弱阶段约在 6 km 以上降水强度快速减小。表明层云降水的物理过程稳定,即层云降水主要来自冻结层冰雪的融化或水汽稳定抬升凝结成降水的。但也看出它们的一些细微的差别,*A* 时刻层云降水层次可以达到 1—25 mm 等 6 个层次,而 *B*、*D* 和 *G* 时刻减弱成 1—15 mm 等 4 个层次,*G* 时刻中 4—6 km 有一个增雨现象。

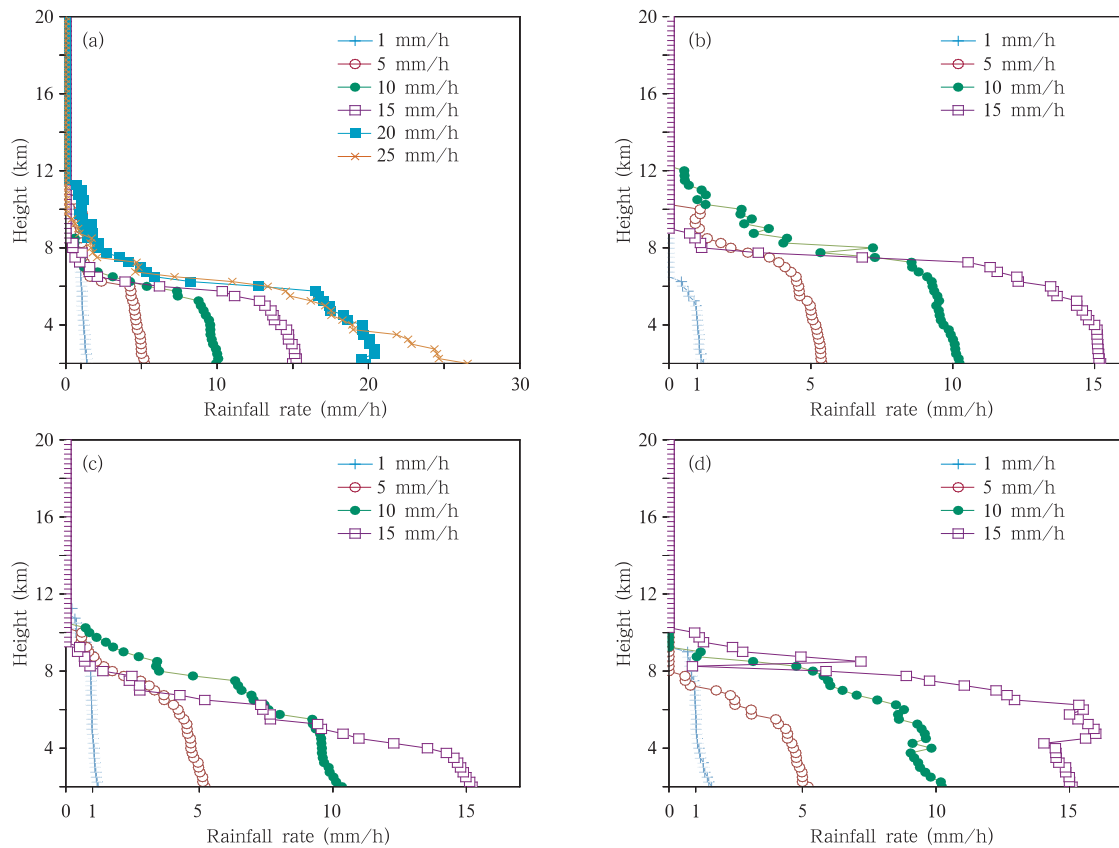


图 10 层云降水率廓线 (a. *A* 时刻, b. *D* 时刻, c. *B* 时刻, d. *G* 时刻)

Fig. 10 As in Fig. 9 but for stratiform rainfall

4.4 雷达风廓线分析

从“2007 年 7 月 9 日”雷达风廓线演变图(图 11)看出,9 日上午 07 时 26 分—08 时 56 分(*A* 时刻对应 08 时 39 分—08 时 48 分),近地面至 4 km 一直吹着西北风,低层有强冷空气侵入;4.3—7.6 km 中高层西南风维持,9.1—15.2 km 高层出现了 20 m/s 的东到东北风急流,高层辐散增强,从而在暴雨区存在低层辐合高层辐散的典型垂直环流结构,加上风向随高度顺转,有暖平流,为强的上升运动提供

了有利条件。13 时 22 分—13 时 45 分(*B* 时刻对应 13 时 31 分—13 时 40 分),4.3—7.6 km 中高层由西南风转变为西北风,随着风向的转变,降水减弱直至停止。“2007. 08. 23—25”TRMM 卫星探测到 *C*—*G* 时刻,雷达风廓线分别对应于 23 日 09 时 34 分—09 时 43 分,24 日 08 时 43 分—08 时 52 分、13 时 29 分—13 时 38 分,25 日 09 时 18 分—09 时 26 分和 14 时 12 分—14 时 21 分。

从“2007. 08. 23—25”雷达风廓线演变图(图

12)看出,受到东风波影响,C时刻对应的风廓线有3段东北风,24日08时43分调整为0.9—6.7 km整层东北风,给后来强降水阶段D时刻,带来了大量的水汽;D时刻前后,0.9—12.2 km整层的东北风,E时刻前后东北风高度降低,仅0.9—4.3 km存在。至25日减弱时段,降水云团活动区域再次下降,在3.4 km以下,风速由东北转为东南风,宜宾东

南部的云贵高原阻挡了水汽的输送通道,降水逐渐停止。比较有意思的是C时刻风向由低层0.6 km处的东南风逆转为中层4.3 km的东北风,4.6—8.5 km由东北风逆转为西北风,表明存在冷平流;D—G时刻,由西北风顺转为东北风,表明有暖平流。冷暖平流的变化表明东风波过来时先降温后增湿,为宜宾产生暴雨天气提供了条件。

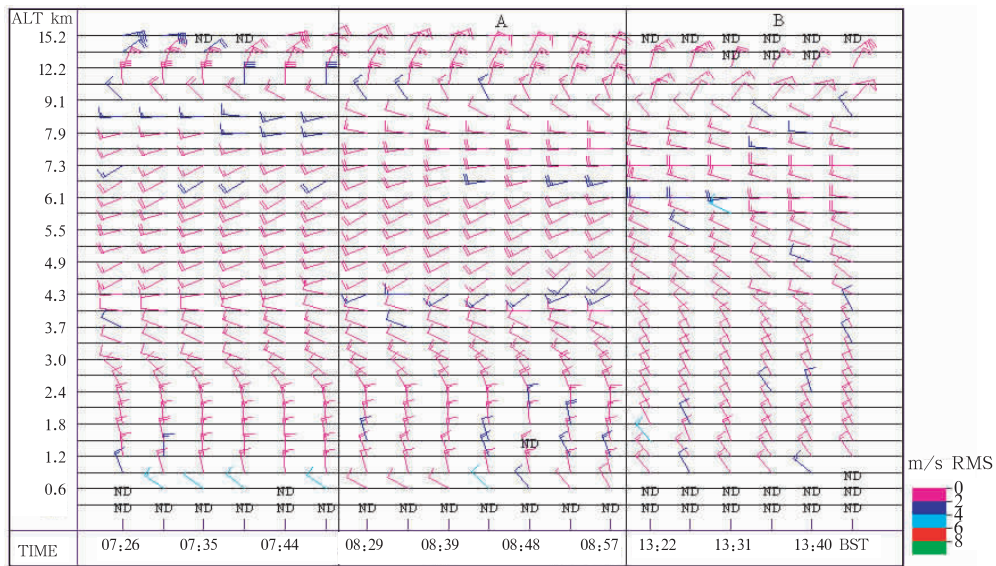


图 11 雷达探测 2007 年 7 月 9 日宜宾上空垂直风廓线变化
Fig. 11 Temporal changes in the vertical wind profile at Yibin on 9 July 2007 as detected by the radar

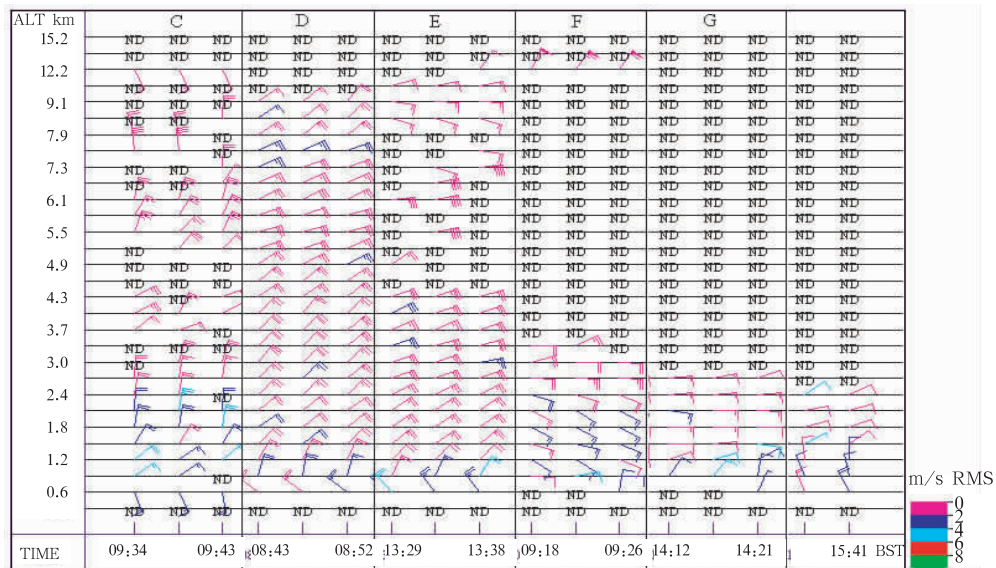


图 12 雷达探测 2007 年 8 月 23—25 日宜宾上空垂直风廓线变化
Fig. 12 As in Fig. 11 but on 23—25 August 2007

由表 1 可以看出,“2007. 08. 23—25”降水云团的垂直高度总体要小于“2007. 07. 09”的。另外“2007. 07. 09”西南低涡引起的暴雨过程,风廓线上反映出降水云团垂直方向是连续的,减弱时降水云团活动高度有所下降,与降水率高度相差 2—4 km,对应的降水也是连续性的。而“2007. 08. 23—25”东风波引起的暴雨过程,风廓线上反映出降水云团活动时断时续,与降水率高度相差 0—8 km,对应的降水也时断时续,时大时小。造成这个现象的原因是西南低涡在川西高原形成以后,迅速南压东移,当影

响到宜宾地区甚至有所加强,引起的降水强度和范围要大得多。而南海台风随着西行能量逐渐消耗掉,再加上宜宾附近地区海拔较高,紧挨着云贵高原和川西高原,东风波到达宜宾以后强度会逐渐减弱。综合比较图 10 和 11,发现“2007. 07. 09”大暴雨区存在低层辐合高层辐散的典型垂直环流结构,而“2007. 08. 23—25”暴雨过程不存在这种典型结构,主要由于东风波槽前的东北风将水汽输送到宜宾地区,由于川西高原和云贵高原大地形的阻挡,水汽在宜宾抬升引发降水。

表 1 A—G 时刻卫星探测的降水率(>1 mm/h)高度和雷达探测的降水云团高度(单位:km)
Table 1 Rainfall height with its rate larger than 1 mm/h as well as the rainfall cloud cluster height (unit: km) for A—G times as detected by the satellite and radar

项目内容	A 时刻	B 时刻	C 时刻	D 时刻	E 时刻	F 时刻	G 时刻
层云降水率高度	10.5	10.0	10.0	11.0	9.75	11.25	6.75
对流降水率高度	16.75	11.0	10.5	14.75	12.5	14.0	10.25
降水云层高度(雷达风廓线)	0.6—15.2	0.6—12.2	0.6—12.2 (不连续)	0.6—9.1	0.6—12.2 (不连续)	0.6—2.7	0.6—2.4

5 结 论

利用 TRMM 卫星和宜宾多普勒雷达探测结果,比较分析了 2007 年夏季在宜宾发生的“2007. 07. 09”和“2007. 08. 23—25”两次区域性暴雨过程降水云团的水平和垂直结构变化特征、降水云团风廓线变化特征,从而找出川南由西南低涡和南海西行台风引发的暴雨在降水结构和风廓线上的共同特征和差异,以及这些特征的演变情况。根据分析,得到如下结论:

(1) 降水水平结构特征:两次过程中发展旺盛阶段降水系统均由一个主降水云团和几个零散的降水云团组成,但“2007. 07. 09”主降水云团的水平范围要大一些,约 200 km,“2007. 08. 23—25”主降水云团的水平范围大约 100 km。减弱阶段“2007. 07. 09”还保持着大块的降水云团,“2007. 08. 23—25”则只剩下零星的降水云团。

(2) 降水垂直结构特征:发展旺盛阶段,“2007. 07. 09”强对流降水的云顶高度可达 17 km,而“2007. 08. 23—25”的约为 11 km,另外二者云中降水强度随高度都呈非均匀分布,最大降水强度出现在 6 km 高度以下的对流层中低层;减弱阶段,“2007. 07. 09”的云顶也可达 14 km 左右的高度,而“2007. 08. 23—25”最高只有 7 km,降水强度随高度

分布相对发展旺盛阶段也要均匀一些。

(3) 平均降水率廓线和最大降水率廓线变化情况是 1.75—4.75 km 逐渐增大,在 4.75—5 km 达到最大,5—8 km 迅速减小,“2007. 07. 09”降水率廓线高度与降水云团活动相差 2—4 km,而“2007. 08. 23—25”降水率廓线高度与降水云团高度相差 0—8 km。

(4) 比较这两次暴雨过程的雷达风廓线,发现“2007. 07. 09”大暴雨区存在低层辐合高层辐散的典型垂直环流结构,减弱时降水云团活动高度有所下降,但雷达风廓线上反映出降水云团活动垂直方向均为连续的,对应的降水也是连续性的,而“2007. 08. 23—25”暴雨过程的雷达风廓线上反映出降水云团活动是时断时续的,对应的降水也是时断时续和时大时小的。

致谢:感谢四川省气象台顾清源高工,宜宾市气象局尧登宇高工和宜宾雷达站黄晓文工程师提供宝贵的雷达资料。

参考文献

- 陈忠明,黄福均,何光碧. 2002. 热带气旋与西南低涡相互作用的个例研究 I: 诊断分析. 大气科学, 26(3): 352-360
- 程明虎,刘黎平,张沛源等. 2004. 暴雨系统的多普勒雷达反演理论和方法. 北京:气象出版社,147-188
- 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,刘栋,王雨等. 2007. 热带测雨卫星综合探测结果之“云娜”台风降水云与非降水云特征. 气象学报, 65(3):316-328
- 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究. 气象学报, 61(4):421-431
- 何会中,程明虎,周凤仙. 2006. 0302号(鲸鱼)台风降水和水粒子空间分布的三维结构特征. 大气科学, 30(3):491-503
- 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):364-377
- 李万彪,陈勇,朱元兢等. 2001. 利用热带降雨测量卫星的微波成像仪观测资料反演地面降水. 气象学报, 59(5):591-601
- 刘奇,傅云飞. 2007. 夏季青藏高原潜热分布及其廓线特征. 中国科学技术大学学报, 30(3):303-309
- 秦剑,琚建华,解明恩. 1997. 低纬高原天气气候. 北京:气象出版社, 79-80
- 吴庆梅,程明虎,苗春生. 2003. 用 TRMM 资料研究江淮、华南降水的微波特性. 应用气象学报, 14(2):206-214
- 姚展予,李万彪,高慧琳等. 2002. 用 TRMM 卫星微波成像仪遥感地面洪涝研究. 气象学报, 60(2):243-269
- 郑媛媛,傅云飞,刘勇等. 2004. 热带测雨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):790-801
- 朱禾,邓北胜,吴洪. 2002. 湿位守恒条件下西南涡的发展. 气象学报, 60(3):343-351
- 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, Averbior, Portugal, 134-146
- Fu Yunfei, Liu Guosheng, Wu Guoxiong, et al. 2006. Tower mast of precipitation over the central Tibetan Plateau summer. Geophys Res Letts, 33(L05802):1-4
- Fu Yunfei, Liu Guosheng. 2007. Possible misidentification of rain type by TRMM PR over Tibetan Plateau. J Appl Meteor Climatol, 46(5):667-672
- Hobbs P V. 1989. Research on clouds and precipitation past, present, and future. Bull Amer Meteor Soc, 70:282-285
- Jin Xin, Li Wanbiao, Zhu Yuanjing. 2003. A study on the Meiyu front using TRMM/ PR data during the 1998 GAME/HUBEX. Adv Atmos Sci, 20:293-298
- Liu G, Fu Y. 2001. The characteristics of tropical precipitation profiles as inferred from satellite radar measurements. J Meteor Soc Japan, 79:131-143
- Schumacher C, Houze R A. 2003. Stratiform rain in the tropics as seen by the TRMM precipitation radar. J Climate, 16(11):1739-1756
- Short D A, Nakamura K. 2000. TRMM radar observations of shallow precipitation over the tropical oceans. J Climate, 13(23):4107-4124
- Zipser E J, Lutz K R. 1994. The vertical profile of radar reflectivity of convective cells: a strong indicator of storm intensity and lightning probability. Mon Wea Rev, 122: 1751-1759