蒋璐君，刘熙明，张弛，2021. 基于 TRMM 卫星资料的江西一次大暴雨过程降水结构特征[J]. 气象与减灾研究，44(4)：257-265.

Jiang Lujun, Liu Ximing, Zhang Chi, 2021. Precipitation structure analysis of a heavy rainstorm in Jiangxi based on TRMM satellite data[J]. Meteorology and Disaster Reduction Research，44(4)：257-265.

基于 TRMM 卫星资料的江西一次大暴雨过程降水结构特征

蒋璐君[1]，刘熙明[1]，张 弛[2]

1. 江西省气象科学研究所，江西 南昌 330096
2. 江西省气象台，江西 南昌 330096

摘 要：利用热带测雨卫星(TRMM)的降水雷达(PR)和微波成像仪(TMI)连续 2 个轨道的探测结果，分析了 2013 年 6 月 26—29 日发生在江西省北部地区的中尺度降水过程不同降水阶段的降水水平结构、雨顶高度、降水廓线的变化特征。结果表明，此次降水过程由强对流云降水逐渐演变为对流性较弱的层状云降水。对流云降水阶段降水系统由成片层状降水云团中分布的多个零散强对流降水云团组成，降水分布不均匀，强对流云降水对总降水量的贡献大。层状云降水阶段，层状云中强对流单体消失，对流云降水像素及对流云降水率对总降水量的贡献减少，降水雨强谱变小，降水高度逐渐降低，云体高层降水量减少。对流云降水和层状云降水廓线存在差异，最大降水率出现的高度越高且中高层降水量越大，降水的对流性则越强。

关键词：暴雨，TRMM 卫星，降水结构，降水廓线

中图分类号：P426.6；P405 **文献标识码**：A **文章编号**：1007-9033(2021)04-0257-09

doi：10.12013/qxyjzyj2021-039

Precipitation Structure Analysis of a Heavy Rainstorm in Jiangxi Based on TRMM Satellite Data

Jiang Lujun[1], Liu Ximing[1], Zhang Chi[2]

1. *Jiangxi Institute of Meteorological Science*, *Nanchang* 330096, *China*
2. *Jiangxi Meteorological Observatory*, *Nanchang* 330096, *China*

Abstract: The horizontal structure of precipitation, the variation characteristics of rain top height and precipitation profile in different precipitation stages of a mesoscale precipitation process happened in the northwest part of Jiangxi during June 26 to 29, 2013 were analyzed by using the data from precipitation radar (PR) and passive microwave imaging (TMI) onboard the Tropical Rainfall Measuring Mission satellite (TRMM). The results showed that the precipitation process gradually evolved from strong convective precipitation to stratiform precipitation with weak convection. In the stage of strong convective precipitation, the precipitation system was composed of several scattered convective precipitation clouds distributed in the stratiform cloud precipitation with uneven precipitation, and the contribution of convective precipitation to the total precipitation was significant. In the stage of stratiform precipitation, the strong convective monomers disappeared, the convective precipitation pixels and the contribution of convective precipitation to the total precipitation decreased, the spectrum and height of precipitation decreased, and the precipitation in the middle and upper layers of the cloud decreased. The vertical precipitation profiles showed that there were differences between convective precipitation and stratiform precipitation profiles, and the higher the maximum precipitation rate and the higher the precipitation in the middle and upper layers, the stronger the convective precipitation.

收稿日期：2021-09-03；**修订日期**：2021-10-26.

基金项目：国家自然科学基金项目(编号：41765001)；江西省气象局气象科研面上项目“江西省风廓线雷达资料的质量控制与同化研究”.

作者简介：蒋璐君，硕士，工程师，主要从事天气预报研究，E-mail：jlj0628@163.com.

Key words: rainstorm; TRMM satellite; precipitation structure; precipitation profile

0 引 言

夏季中尺度降水是导致中国长江流域出现暴雨灾害的主要天气过程之一。对于降水的成因、机理和分布,许多学者应用观测资料分析和数值模拟等方法做了大量研究并取得了诸多成果(毕宝贵等,2006;倪允琪等,2006;武文博等,2018;何博翰等,2020)。但是,作为强降水观测主要工具的气象雷达由于受到地形条件和环境的限制(王振会,2001;Battaglia et al,2015;韩静等,2019),其观测资料存在缺陷,制约了对强降水的三维结构、雨顶高度及其廓线等特征的深入研究,因此利用卫星观测资料进行气象数据反演越来越受到国内外学者的关注(衡志炜和傅云飞,2014)。随着 1997 年 11 月热带测雨卫星(Tropical Rainfall Measuring Mission satellite,TRMM)(Kummerow,2000)的成功发射,为研究陆面降水的结构、分布以及云中微物理特性提供了有利条件。TRMM 卫星搭载的降水雷达(Precipitation Radar,PR)提供垂直分辨率 0.25 km 的降水数据,这也是降水雷达相对于其他地基雷达的一个最主要的优势,因此利用高时空分辨率的 TRMM 卫星资料研究降水三维结构可以弥补传统地基雷达资料的不足。

由于卫星微波能穿透一定的云层,对云中的微物理特性的观测更为直观,且雨滴对微波辐射的传输有强烈的影响,因此用星载微波辐射计能够探测到更多的降水信息。TRMM/PR 能捕获降水的垂直和水平分布特征,而降水的垂直分布能一定程度反映降水的热力和动力结构以及云中微物理特性,降水的水平分布能反映降水云团的性质及其所处状态。降水的三维结构也是许多研究风暴和全球循环模式的学者想要获得的数据信息(Iguchi et al,2000)。傅云飞等(2008)利用卫星资料研究了对流云降水和层状云降水的降水频次和垂直结构特征,指出亚洲地区陆面对流云和层状云降水强度均弱于洋面,且对流云降水存在 4 层结构,层状云降水存在 3 层结构。Xiang 等(2013)利用 TRMM 卫星数据研究了一次由折回高原涡引起的持续性强降水过程中,对流云和层状云降水在高原涡旋运动四个阶段的三维结构特征。张祎等(2010)利用测雨雷达和闪电成像仪观测资料,分析了 2007—2008 年南京及其周边地区的对流云降水结构和闪电特性,指出对流云降水是降水云系处于发展阶段降水量的主要贡献者,而层状云降水是降水云系处于成熟或者消亡阶段降水量的主要贡献者。

尽管 TRMM 卫星资料已经被广泛应用于中国中东部、青藏高原、热带地区的降水系统的三维结构特征研究(何文英和陈洪滨,2006;傅云飞等,2008;王宝鉴等,2017),但目前利用 TRMM 卫星资料对江西地区强降水的研究还比较少。因此,文中利用 TRMM 卫星资料对 2013 年 6 月 26—29 日发生在江西省西北部地区的一次中尺度降水过程的两次观测结果,分析不同降水阶段的降水水平结构、雨顶高度、微波亮温和降水廓线等变化特征,旨在加深对降水结构等云微物理特性的认识。

1 TRMM 卫星探测数据简介

TRMM 卫星提供大量的热带海洋降水、云中液态水含量以及潜热等气象数据。文中主要使用由 TRMM 资料中心提供的标准产品:2A25 和 1B11,分别是由降水雷达(Precipitation Radar,RP)和微波成像仪(Microwave Imager,TMI)探测资料处理和反演得到的。TMI 是 TRMM 卫星上搭载的被动微波辐射计,除 21.3 GHz 频率只有垂直极化通道外,其他 10.65、19.35、37、85 GHz 四个频率均有水平和垂直双极化通道,共有 9 个通道。TMI 是以圆锥的方式进行扫描,扫描宽度是 758.5 km,水平分辨率从低频 10.65 GHz 的 39 km 到高频 85 GHz 的 5 km。文中使用 TRMM/TMI 标准产品 1B11 提供的每个像素 85 GHz 垂直极化亮温。

RP 是 TRMM 卫星上搭载的主动探测雷达,水平和垂直分辨率分别为 4.5 km 和 2.5 km(星下点),可以对降水云的垂直分布进行较高精度的探测。2A25 产品是根据 Z-R 关系利用 PR 回波计算得到逐条轨道的降水廓线数据,可提供分析自地表向上 20 km 高度的降水率空间分布,一共 80 层。2A25 降水廓线资料还提供降水类型,根据 TRMM V(Awaka et al,1998)和 H(Steiner et al,1995)方法,将降水分为层状云降水、对流云降水和其他类型降水。为综合分析 TRMM 卫星的 PR 和 TMI 降水信息,将 1B11/85 GHz 微波辐射亮温资料与 2A25 降水资料匹配。具体方法是采用距离平方反比进行插值,将微波亮温值插值到降水廓线资料中,使得每个 PR 像素都有对应的微波亮温值。

2013 年 6 月 26—29 日强降水期间,TRMM 卫星过境的时间分别为 2013 年 6 月 27 日 06:28 和 28 日 11:25(北京时,下同),轨道号分别为 88950 和 88953。2 条轨道都经过江西省出现降水的区域,结合实况降水强度分析得到后一轨道相对前一轨道有明显减弱,可以用来分析此次降水过程的暴雨云降水成熟期和消散期两个阶段。分析 TMI/85 GHz 垂直极化微波辐射亮温分布(图 1)发现,27 日 06:28(A 时刻,下同)和 28 日 11:25(B 时刻,下同)江西省北部出现了整片系统性的对流降水云系,高于 225 K 的亮温位于降水云系之上,但随着降水的减弱,低于 225 K 的亮温区域逐渐缩小。

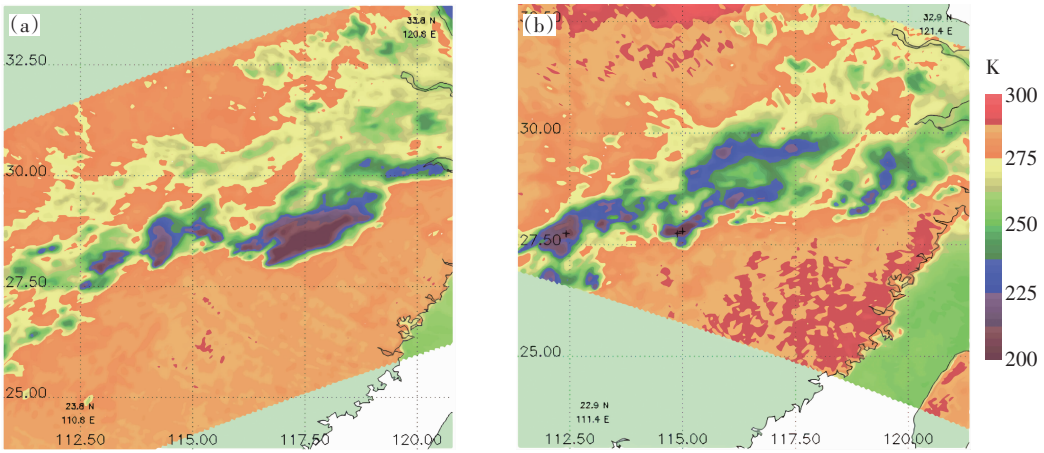


图 1 2013 年 6 月 27 日 06:28(a)和 28 日 11:25(b)TRMM/TMI 探测的 85 GHz 微波亮温

Fig. 1 Brightness temperature of 85 GHz microwave radiation at (a) 06:28 BT on June 27, 2013 and (b) 11:25 BT on June 28, 2013 detected by TRMM/TMI

2 降水实况与环境背景

2013 年 6 月 26—29 日江西省北部地区出现了一次特大暴雨天气过程(图 2)。此过程属于持续性强降水天气过程,从 26 日 08 时开始到 29 日 20 时结束,持续了 4 d。主降水带由北向南逐渐南压,降水范围大、强度强,过程累计雨量大,造成 20 个县(市)过程累计雨量超过 200 mm,6 个县(市)超过 400 mm。整个强降水过程中,28 日凌晨为降水强度最强时段,3 h 雨量最大为 145.5 mm,1 h 雨量最大为 72.2 mm。强降水致使江西省北部局部出现洪涝灾害。

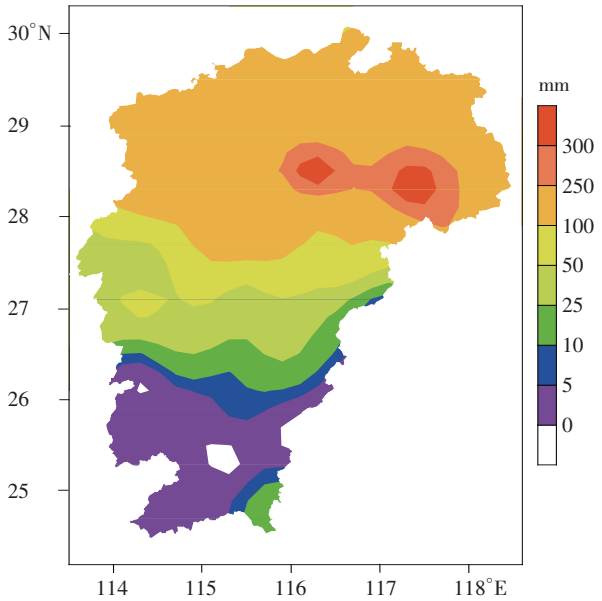


图 2 2013 年 6 月 26 日 08 时—29 日 08 时江西省累计降水量分布

Fig. 2 Distribution of accumulated rainfall during 08:00 BT on June 26 and 08:00 BT June 29, 2013

此次降水过程是在有利的大尺度环流背景下产生的。分析图 3 发现,500 hPa 层中高纬地区环流形势呈“两脊一槽”型。两脊分别位于鄂霍次克海的西侧和乌拉尔山附近;一槽为横槽,包含 2 个低涡中心,分别位于巴尔喀什湖和贝加尔湖附近。西太平洋副热带高压呈带状分布,其脊线稳定维持在 21°N 附近。副热带高压西侧的偏南气流为长江中下游地区输送大量水汽,最大水汽通量达 24 kg/(s·hPa·cm),南昌站上空 925 hPa 层比湿可达 15 g/kg,江西省北部位于水汽通量的大值区。低槽南侧的河套地区不断有小槽东移南下,为江西省北部地区带来正涡度平流和弱冷空气,冷暖气流交汇有利于暴

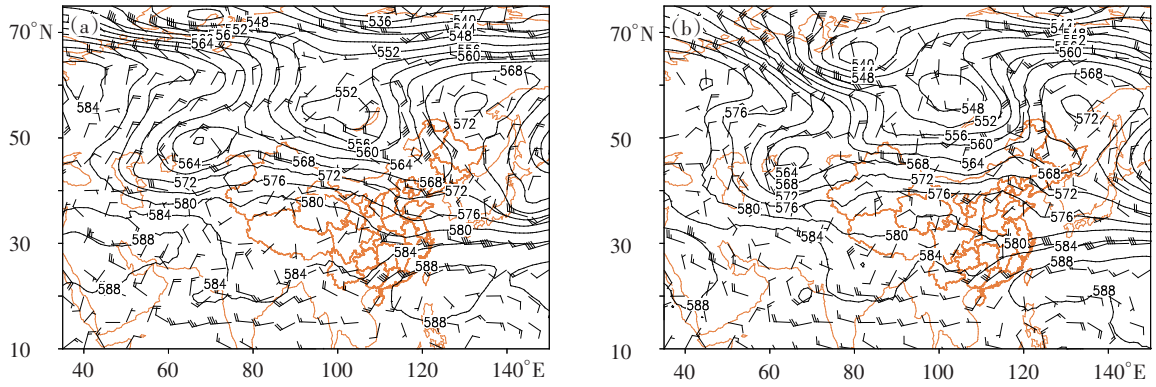


图 3 2013 年 6 月 27 日 08:00(a)、28 日 08:00(b)500 hPa 位势高度场(等值线,单位:dagpm)和风场(风矢)

Fig. 3 500 hPa geopotential height field (isoline; units:dagpm) and wind field (vector) at 08:00 BT 27 June 2013 (a) and 08:00 BT 28 June 2013 (b)

雨天气的发生。除此之外,700 hPa 高度层上配合有切变线存在且不断南压,切变线的南侧存在与之相平行的西南风急流,导致暴雨区上空的层结不稳定(图略)。进一步分析 28 日 02:00 和 08:00 的 500 hPa 层与 850 hPa 层的假相当位温差(图 4)发现,两个时刻的 TRMM 卫星扫描区均位于假相当位温差的负值区,即对流不稳定区域,后者的面积小于前者。

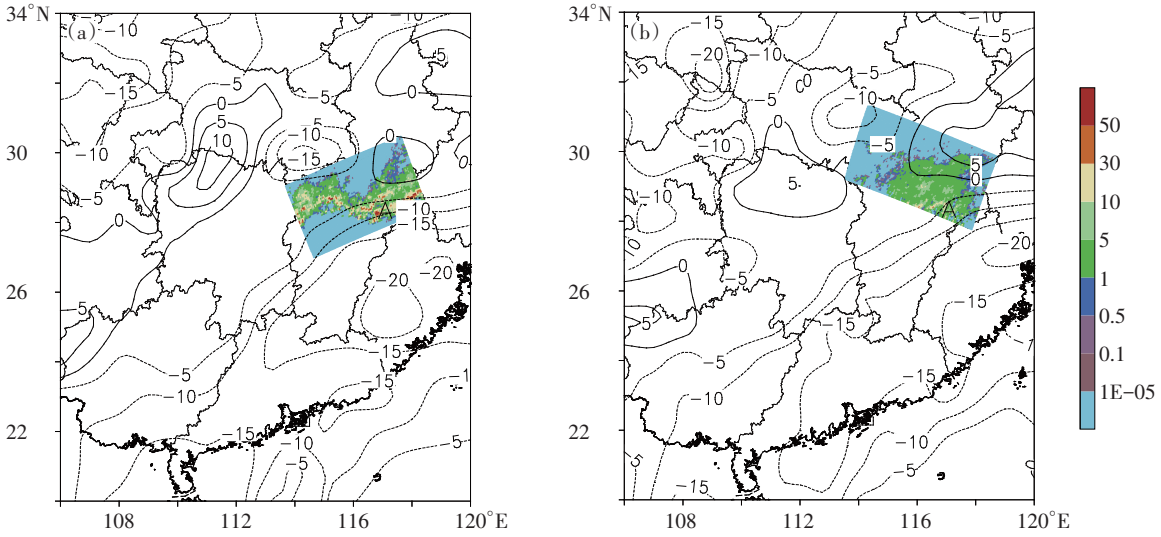


图 4 2013 年 6 月 28 日 06:28(a)、11:25(b)TRMM/PR 探测的 2 km 降水率(彩色区,单位:mm/h)和 500 hPa 层与 850 hPa 层假相当位温差(等值线,单位:℃)

Fig. 4 Precipitation rate at 2 km detected by TRMM/PR (units:mm/h) and the pseudo-equivalent temperature difference (units:mm) between 500 hPa and 850 hPa at 06:28 BT (a) and 11:25 BT (b) on June 28, 2013

3 降水结构

3.1 降水水平结构

考虑到 2 km 以下地表可能会对 TRMM/PR 回波产生干扰,文中选取 2 km 高度处的降水率近似作为地表雨强来分析暴雨的水平结构(图 5)。分析发现,此次降水系统是一条呈东北—西南向带状分布的主降水雨带,导致的降水分布极不均匀。雨带上有多个强对流云降水雨团,都位于江西省北部地区(地表雨强大于 20 mm/h),面积大小不等。此次暴雨过程中降水云团形式的不是完整的降水区,在强雨团之间还存在弱降水区甚至无降水区。对比分析图 5a、图 5b 发现,从 A 时刻到 B 时刻随着降水的减弱,强降水中心范围逐渐缩小甚至消失,主降水

雨带也转变为大片的层状云降水带(地表雨强小于 10 mm/h),表明降水系统可能处于对流发展过程的后期,即由对流云降水向层状云降水过渡。与江西省区域站实况数据(图 5c、d)对比发现,TRMM/PR 扫描的雨带与实况无论在降水落区还是降水强度均对应较好。

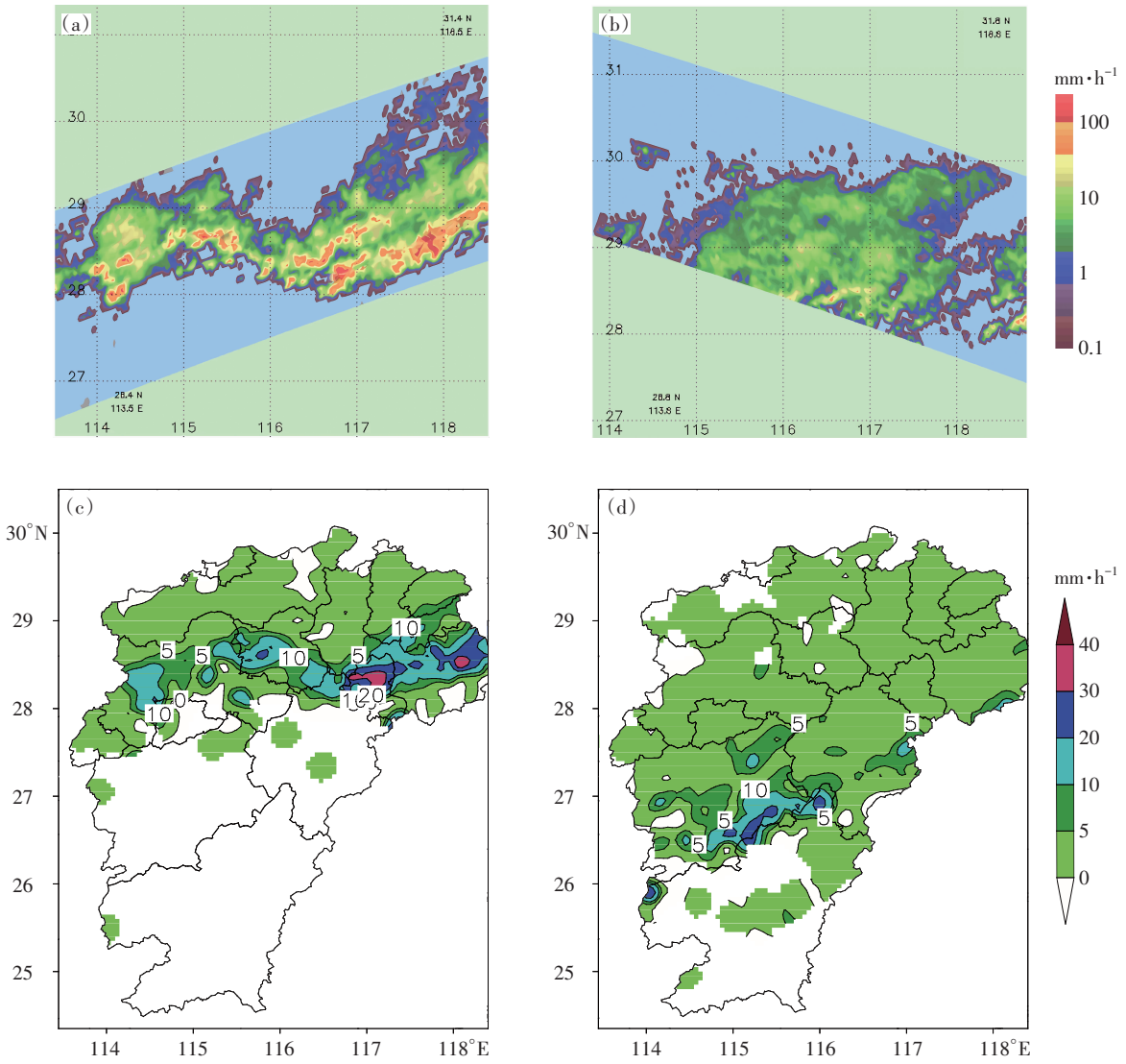


图 5 2013 年 6 月 27 日 08:00(左)、28 日 08:00(右)TRMM/PR 探测的 2 km 高度降水率(a、b)和地表雨强(c、d)分布

Fig. 5 Distribution of precipitation rate at 2 km captured by TRMM/PR(a,b) and surface precipitation intensity (c,d) at 08:00 BT on June 27, 2013 (left) and 08:00 BT on June 28, 2013 (right)

表 1 给出了 TRMM 卫星于 A 时刻和 B 时刻探测的对流云和层状云的像素比例、降水量贡献率和降水率。分析发现,从 A 时刻到 B 时刻,即从成熟期到消散期,对流云像素比例减少,而层状云像素比例增加,两者比例由 0.27 转变为 0.05。与之相对应,对流云对总降水量的贡献率减少,而层状云的贡献率增加,两者比例由 1.38 转变为 0.18。这表明,相较于层状云,对流云覆盖面积小但对总降水量的贡献率更大。对流云像素比例越大,其降水率越大。随着降水减弱,对流云的像素比例、降水贡献率和降水率均减小,但层状云的降水率从小于对流云变为大于对流云。总之,在不同降水阶段,两类降水云对总降水贡献不同,即降水强盛阶段,对流云降水起主导作用,而降水消散阶段,层状云降水起主导作用。

分别计算降水天气过程 A 时刻和 B 时刻的对流云降水和层状云降水在 2 km 高度处不同地面雨强条件下的降水量占总降水量的比例和样本数占总样本数的比例(图6)。结果表明,无论是降水的强

表 1 TRMM/PR 探测的不同降水云的像素比例、降水贡献率和降水率

Table 1 Pixel ratio, precipitation contribution rate and precipitation rate of different precipitation clouds detected by TRMM/PR

时刻	降水云类型	像素比例/%	降水贡献率/%	降水率/(mm·h^{-1})
2013-06-27T06:28	对流云	21	58	12.7
	层状云	79	42	3.7
2013-06-28T11:25	对流云	5	15	2.1
	层状云	95	85	8.1

盛阶段还是减弱阶段,对流云降水的雨强谱均宽于层状云降水。A 时刻,对流云降水率主要集中在大于 10 mm/h 范围内,降水量对总降水量的贡献率超过 67%,其中降水率大于 30 mm/h 的贡献率为 46.7%,且在不同降水率范围内两类降水的样本数较接近。B 时刻,对流云降水样本数在降水率较大(>20 mm/h)范围内减少,但在降水率较小的范围内(≤20 mm/h)样本数占比增加约 70%,且降水率大于 30 mm/h 对总降水量的贡献率减小为 6.3%。层状云降水的降水率集中在 1—20 mm/h,其中降水率 1—5 mm/h 范围内的降水量对总降水量的贡献最大,样本占比也最大。从降水过程的 A 时刻到 B 时刻,降水率 5—10 mm/h 和 10—20 mm/h 范围内的层状云降水量对总降水量的贡献率稍减小,降水率 1—5 mm/h 范围内的贡献率增大。总的来说,随着降水过程的延续对流云降水率集中区由 10—50 mm/h 变为 1—20 mm/h,降水率大于 50 mm/h 范围内的降水量对总降水量的贡献率从 16.6%减小到 0。因此,层状云和对流云降水率的分布变化也可以反映此次降水过程由强向弱逐渐转化,对流云降水逐渐减弱,层状云降水逐渐增强。

Houze(1997)研究指出,如果降水过程中对流云降水像素比例高,表明该系统处于早期发展旺盛阶段;如果层状云降水像素比例高,则表明系统处于衰减阶段。也就是说,由连续监测的两个时刻的降水结构变化可以推测对流云降水由强变弱,层状云降水由弱变强,这也基本反映此次降水过程减弱变化的趋势。

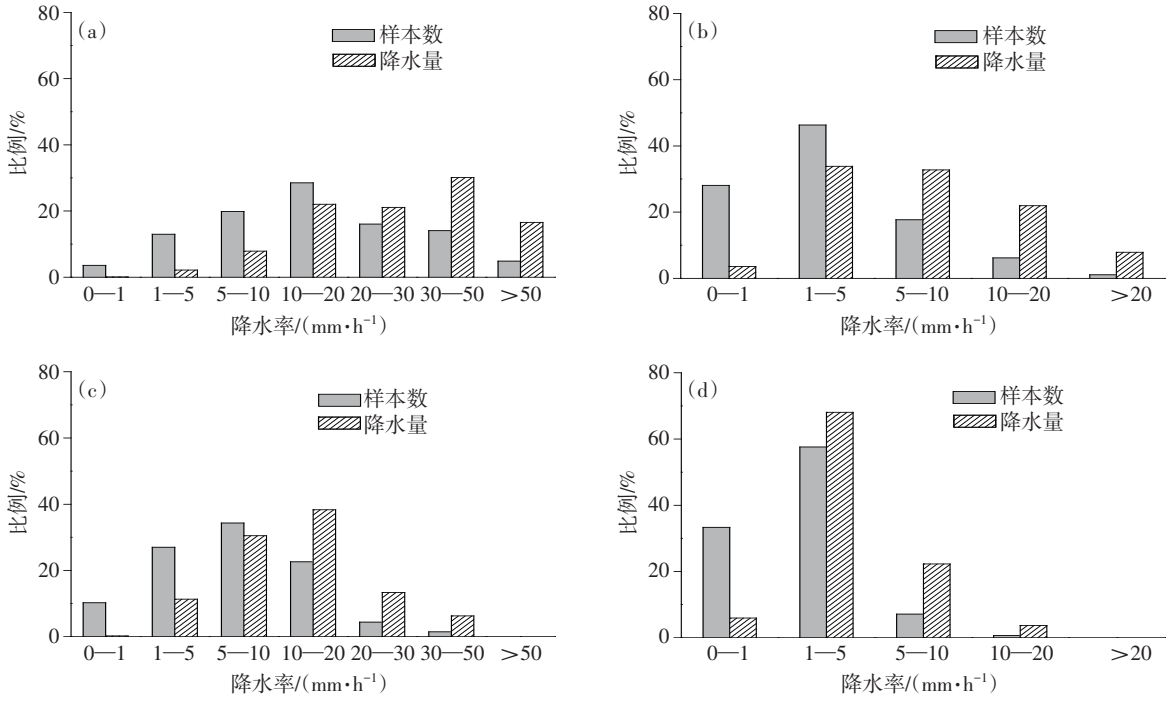


图 6 2013 年 6 月 27 日 06:27(a、b)和 28 日 11:25(c、d)对流云降水(左)和层状云降水(右)的地表雨强谱分布

Fig. 6 Spectral distribution of surface precipitation rate of convective precipitation (left) and stratiform precipitation (right) at 06:27 BT on June 27, 2013 (a,b) and 11:25 BT on June 28, 2013 (c,d)

3.2 降水雨顶高度

降水雨顶高度能反映降水云体在垂直方向上的发展变化程度(Zipser and Lutz,1994)。图 7 给出了所有像素雨顶高度的水平分布。分析发现,A 时刻最大雨顶高度大于 B 时刻,A 时刻中绝大部分像素的雨顶高度集中在 8—14 km 范围内,而 B 时刻绝大部分像素的雨顶高度集中在 6—8 km,两个时刻的边缘降水雨顶高度集中在 4—6 km。图 8 为降水天气过程 A 时刻和 B 时刻在不同地表雨强条件下的雨顶高度。分析发现,两个时刻降水的平均雨顶高度均随地表雨强的增大而不断升高,A 时刻整体雨顶高度集中在 3—12 km,而 B 时刻集中在 3—8 km,且集中于地表雨强小于 40 mm/h 范围内,即 A 时刻雨顶高度较高,云中上升运动较强,云团发展深厚。这种雨顶高度随着降水过程的延续而减小的现象也反映了对流云降水由强逐渐转弱的趋势。

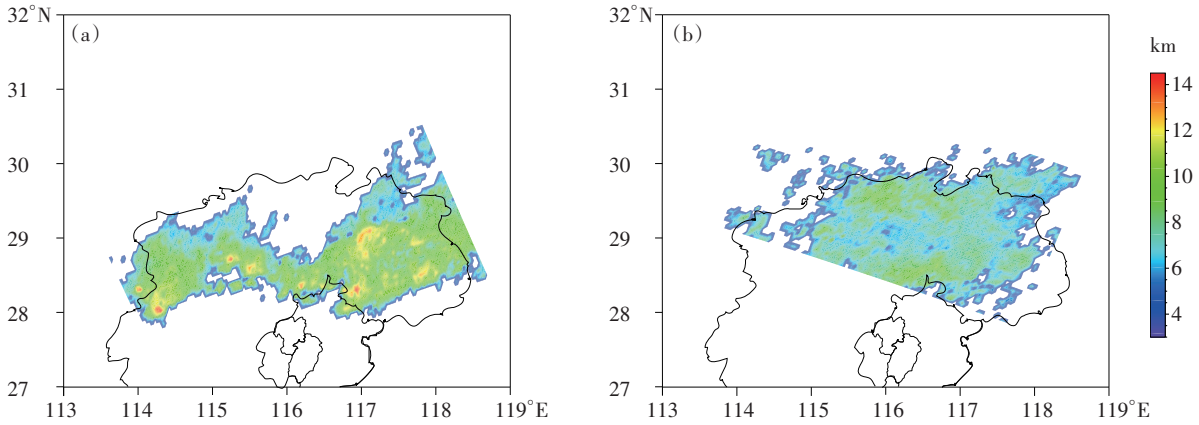


图 7 TRMM/PR 探测的 2013 年 6 月 27 日 06:27(a)和 28 日 11:25(b)雨顶高度的水平分布

Fig. 7 Horizontal distribution of rain top heights detected by TRMM at 06:27 BT on June 27, 2013 (a) and 11:25 BT on June 28, 2013 (b)

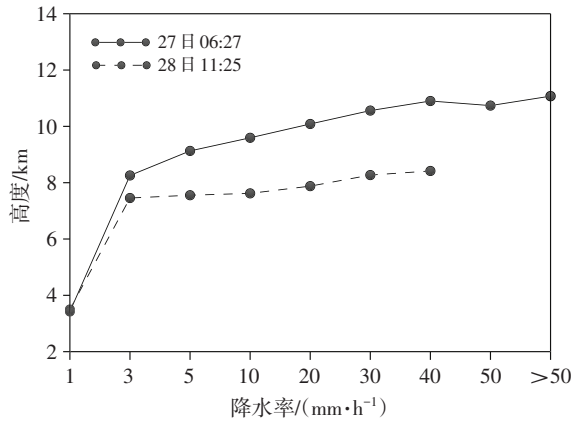


图 8 2013 年 6 月 27 日 06:27 和 28 日 11:25 不同地表雨强条件下的雨顶高度

Fig. 8 Distribution of rain top under different surface rain rate at 06:27 BT on June 27, 2013 and 11:25 BT on June 28, 2013

3.3 降水垂直廓线

文中选取地表雨强值 ± 0.5 mm/h 范围内所有降水像素的廓线,求其平均值作为对应地表雨强的降水廓线。图 9 给出了降水过程 A 时刻和 B 时刻 2 km 高度处的对流云降水和层状云降水廓线。分析发现,两个时刻的降水廓线反映了对流云降水由强到弱的变化趋势,而每层的斜率差异反映了降水粒子碰并增长或蒸发的主要微物理过程的差异。对流云降水廓线明显不同于层状云降水廓线:A 时刻降水系统的最大降水率出现在 3—4 km 高度,而 B 时刻降水系统的最大降水率出现在 2—3 km 高度(接近地表)。这表明,雨滴碰并增长、降水粒子的抬升、上升气流都发生在一个较低的高度层,即雨滴碰并小粒子增长或冰相粒子的融化是 A 时刻中对流云降水在 5 km 高度以下的主要微物理过程。而 A 时刻,对流云降水在 5 km 高度以下不仅存在雨滴碰并小粒子增长或冰相粒子融化,而且存在雨滴融化或蒸发的过程。从廓线斜率也可看出,层状云降水廓线比对流云降水廓线的变化更小,这也说明层状云降水比对流云降水更稳定。A 时刻中高层(6—12 km)仍有一些可观降水,而 B 时刻 7—8 km 高度处,降雨率较低,即降水云层变薄。以上都说明对流云降水在垂直方向上发展的不均匀性,且随着降水过程的延续,对流云降水也逐渐减弱。层状云降水廓线表现为,两个时刻在 5 km 冻结高度(雷达回波亮带位置)以下,降水率较为稳定,这表明此高度以

下雨滴并没有经历进一步的碰并增长或蒸发。分析图9还发现,对流云降水率大于25 mm/h、层状云降水率大于10 mm/h的降水廓线,在B时刻并没有出现。

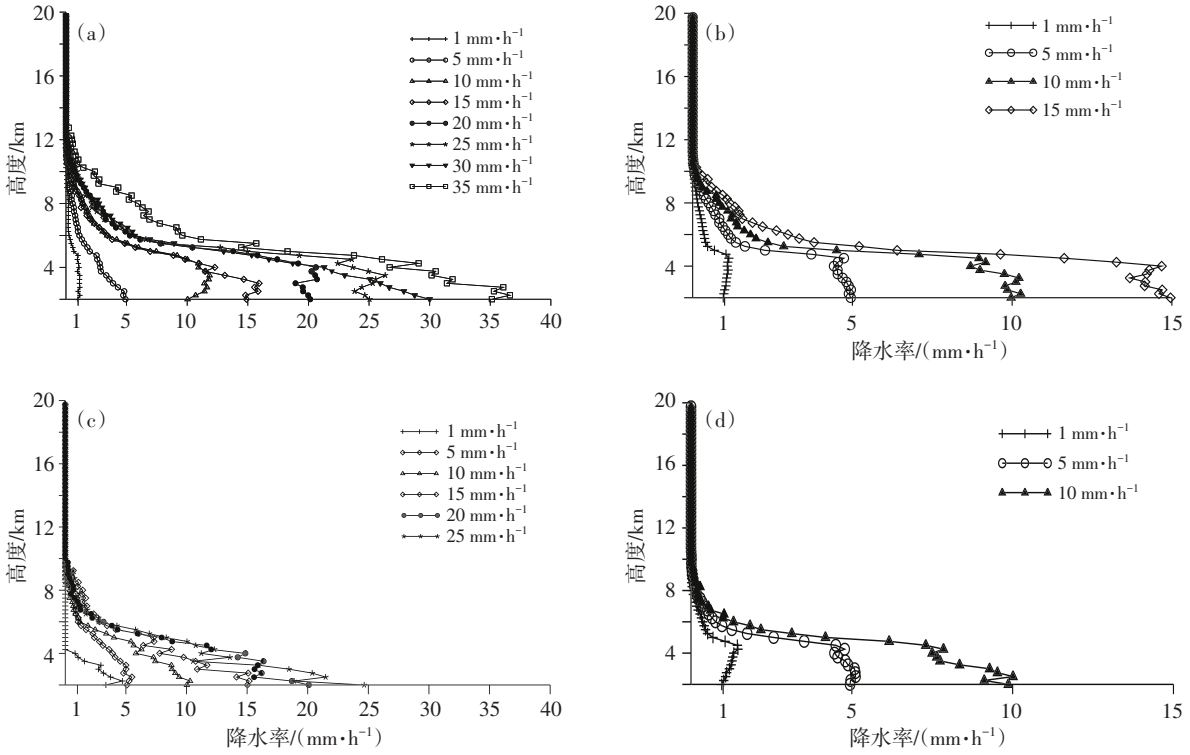


图9 2013年6月27日06:27(a、b)和28日11:25(c、d)对流云降水(左)和层状云降水(右)平均廓线

Fig. 9 Mean profiles of convective precipitation (left) and stratiform precipitation (right) at 06:27 BT on June 27, 2013 (a,b) and 11:25 BT on June 28, 2013 (c,d)

4 结 论

文中利用TRMM卫星搭载的降水雷达(PR)、微波成像仪(TMI)探测结果,分析了江西省北部地区2013年6月26—29日中尺度降水系统两个时刻的降水水平结构、雨顶高度和微波亮温变化、降水云垂直廓线等特征,得到以下主要结论:

1) 对流云降水阶段,降水是由大面积的层状云中分布的多个零散对流单体造成的,分布极不均匀。层状云降水阶段,强降水中心减小甚至消失,雨强变化不显著,对流云降水的像素和平均降水率均减小,对总降水量的贡献率也减小,且对流云降水样本数和强降水(>30 mm/h)对总降水量的贡献率均逐渐减小。整个降水过程中,层状云降水雨强谱要窄于流云降水,且90%降水集中于10 mm/h以下。

2) 整个降水过程中,随着地表雨强的增大,雨顶高度和微波亮温逐渐增加,且不同阶段雨顶高度也存在差异。从对流云降水到层状云降水的演变过程中,最大降水雨顶高度从11 km左右降为8 km左右,且绝大部分像素的雨顶高度的分布范围也由6—14 km缩小为6—10 km。

3) 对流云降水和层状云降水廓线存在较大差异,最大降水率出现的高度越高且中高层降水量的贡献率越大,降水的对流性则越强;反之,最大降水率出现的高度越接近地面且中低层对降水量的贡献率越大,降水则表现为稳定的层状云降水。

参考文献(References)

Awaka J, Iguchi T, Okamoto k, 1998. Early results on rain type classification by the tropical rainfall measuring mission (TRMM) precipitation[C]. Proc. 8th URSI Commission Final Open Symp., Averio, Portugal,143-146.

Battaglia A, Tanelli S, Mroz K, et al, 2015. Multiple scattering in observations of the GPM dual-frequency precipitation radar: Evidence and impact on retrievals[J]. J Geophys Res,120(9): 4090-4101.

毕宝贵,鲍媛媛,李泽椿,2006."02.6"陕南大暴雨的结构及成因分析[J].高原气象,25(1):34-44. Bi B G, Bao Y Y, Li Z C, 2006. Structure and causes of "02.6" extremely heavy rain in the southern Shaanxi province[J]. Plateau Meteor,25(1):34-

44. (in Chinese)

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[J]. 气象学报,65(3):316-328. Fu Y F, Liu D, Wang Y, 2007. Characteristics of precipitating and non-precipitation clouds in Typhoon Ranan as viewed by TRMM combined measurements[J]. Acta Meteor Sinica, 65(3):316-328. (in Chinese)

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[J]. 气象学报,66(5):730-746. Fu Y F, Zhang A M, Liu Y, et al, 2008. Characteristics of seasonal scale convective and stratiform precipitation in Asia based on measurements by TRMM Precipitation Radar[J]. Acta Meteor Sinica,66(5):730-746. (in Chinese)

韩静,楚志刚,王振会,等,2019. 地基雷达与 TRMM/PR 的一致性分析[J]. 气象科学,39(1):93-103. Han J, Chu Z G, Wang Z H, et al, 2019. Consistency analysis between ground-based radars and TRM/PR[J]. Scientia Meteor Sinica,39(1):93-103. (in Chinese)

何博翰,孙建奇,于恩涛,等,2020. 大兴安岭和长白山地形影响东北夏季降水的数值模拟研究[J]. 气候与环境研究,25(3):268-280. He B H, Sun J Q, Yu E T, et al, 2020. Simulation study on the influence of the Great Khingan Strip and Changbai Mountain on summer rainfall in Northeast China [J]. Climatic Environ Res,25(3):268-280. (in Chinese)

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[J]. 气象学报,64(3):364-375. He W Y, Chen H B, 2006. Analysis of evolutional characteristics of a hailstorm precipitation from TRMM observations[J]. Acta Meteor Sinica, 64(3):364-375. (in Chinese)

衡志炜,傅云飞,2014. 格点尺度对 TRMM 微波成像仪云水数据的影响[J]. 气候与环境研究,19(6):693-702. Heng Z W, Fu Y F, 2014. Impact of gridding scale on TRMM microwave imager cloud water information[J]. Climatic Environ Res,19(6):693-702. (in Chinese)

Houze R A Jr, 1997. Stratiform precipitation in regions of convection: A meteorological paradox? [J]. Bull Amer Meteor Soc, 78:2179-2196.

Iguchi T, Kozu T, Meneghini R, et al, 2000. Rain-profling algorithm for the TRMM precipitation radar[J]. J Appl Meteor, 39:2038-2052.

Kummerow C, Simpson J, Thiele O, et al, 2000. The status of the tropical rainfall measuring mission (TRMM) after two years orbit[J]. J Appl Meteor Climatol,39(12):1965-1982.

倪允琪,周秀骥,张人禾,等,2006. 我国南方暴雨的试验与研究[J]. 应用气象学报,17(6):690-704. Ni Y Q, Zhou X J, Zhang R H, et al, 2006. Experiments and studies for heavy rainfall in southern china[J]. J Appl Meteor Sci,17(6):690-704. (in Chinese)

Steiner M, Houze R A Jr, Yuter S E, 1995. Climatological characterization of three-dimensional storm structure from operational radar and rain gauge data[J]. J Appl Meteor Climatol, 34(9):1978-2007.

王宝鉴,黄玉霞,魏栋,等,2017. TRMM 卫星对青藏高原东坡一次大暴雨强降水结构的研究[J]. 气象学报,75(6):966-980. Wang B J, Huang Y X, Wei D, et al, 2017. Structure analysis of heavy precipitation over the eastern slope of the Tibetan Plateau based on TRMM data[J]. Acta Meteor Sinica,75(6):966-980. (in Chinese)

王振会,2001. TRMM 卫星测雨雷达及其应用研究综述[J]. 气象科学,21(4):491-500. Wang Z H, 2001. A brief introduction to TRMM precipitation radar and a summary on the study of its applications[J]. Scientia Meteor Sinica, 21(4):491-500. (in Chinese)

武文博,游庆龙,王岱,等,2018. 中国东部夏季极端降水事件及大气环流异常分析[J]. 气候与环境研究,23(1):47-58. Wu W B, You Q L, Wang D, et al, 2018. Characteristics of extreme precipitation and associated anomalous circulations over eastern China during boreal summer [J]. Climatic Environ Res,23(1):47-58. (in Chinese)

Xiang S Y, Li Y Q, Li D, 2013. An analysis of heavy precipitation caused by a retracing plateau vortex based on TRMM data[J]. Meteorol Atmos Phys, 122:33-45.

张祎,王振会,肖稳安,2010. 南京对流降水和闪电的 TRMM 资料分析[J]. 气象科学,30(4):468-474. Zhang Y, Wang Z H, Xiao W A, 2010. Analysis of convective precipitation and lightning in Nanjing district TRMM satallite[J]. Scientia Meteor Sinica,30(4):468-474. (in Chinese)

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? [J]. Mon Wen Rev,122(8):1751-1759.