

蒋璐君, 李国平, 王兴涛. 2015. 基于 TRMM 资料的高原涡与西南涡引发强降水的对比研究 [J]. 大气科学, 39 (2): 249–259, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1407.13260. Jiang Lujun, Li Guoping, Wang Xingtiao. 2015. Comparative study based on TRMM data of the heavy rainfall caused by the Tibetan Plateau vortex and the southwest vortex [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 39 (2): 249–259.

基于 TRMM 资料的高原涡与西南涡 引发强降水的对比研究

蒋璐君^{1,2} 李国平¹ 王兴涛³

1 成都信息工程学院大气科学学院, 成都 610225

2 江西省气象科学研究所, 南昌 330046

3 宜昌三峡机场, 宜昌 443007

摘 要 利用 TRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission) 卫星探测结果结合 NCEP (National Centers for Environmental Prediction) 再分析资料, 对 2007 年 7 月 17 日四川、重庆地区的一次西南涡强降水系统和 2008 年 7 月 21 日四川东部的东移高原涡强降水系统的三维结构特征、雨顶高度以及降水廓线特征进行对比分析研究。结果表明: (1) 两次降水过程均是发生在西南—东北向的水汽辐合带中, 且降水云群均位于低涡的东南方。(2) 两次强降水在水平结构上均表现为由一个主降水雨带和多个零散降水云团组成, 高原涡强降水过程比西南涡强降水的降水强度和范围都要大。降水雷达探测到的两个中尺度降水系统均以降水范围大、强度弱的层云降水为主, 但对流性降水对总降水量的贡献较大, 其中西南涡降水中对流降水所占比例比高原涡的大, 对总降水率的贡献也大。(3) 垂直结构上: 两次强降水的雨顶高度均是随地表雨强的增加而增加, 且最大雨顶高度接近 16 km, 但西南涡强降水中的雨顶高度比高原涡更高, 说明西南涡降水过程中对流旺盛程度强于高原涡。(4) 两次强降水中雨滴碰并增长过程以及凝结潜热的释放主要集中在 8 km 以下, 但 8 km 以上西南涡降水变化大于高原涡, 且前者在 8~12 km 高度层的降水量对总降水量贡献百分比大于后者。

关键词 西南涡 高原涡 TRMM 卫星 降水结构

文章编号 1006-9895(2015)02-0249-11

中图分类号 P458

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1407.13260

Comparative Study Based on TRMM Data of the Heavy Rainfall Caused by the Tibetan Plateau Vortex and the Southwest Vortex

JIANG Lujun^{1,2}, LI Guoping¹, and WANG Xingtiao³

1 College of Atmospheric Sciences, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225

2 Meteorological Research Institute of Jiangxi Province, Nanchang 330046

3 Yichang Sanxia Airport, Yichang 443007

Abstract A comparative study has been made on the three dimensional structures, distribution of the rain heights, and precipitation profiles of two precipitation systems generated by the southwest vortex (SWV) which occurred in Sichuan and Chongqing on July 17, 2007 and the Tibetan Plateau vortex (TPV) which occurred in the western part of Sichuan on July 21, 2008, respectively. The study is based on Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) data, combined with the

收稿日期 2013-09-10; 网络预出版日期 2014-07-04

资助项目 国家自然科学基金项目 91337215、41175045, 国家重点基础研究发展计划 (973 计划) 项目 2012CB417202, 公益性行业 (气象) 科研专项 GYHY201206042

作者简介 蒋璐君, 女, 1989 年出生, 硕士, 主要从事天气动力学研究. E-mail: jlj0628@163.com

通讯作者 李国平, E-mail: liguoping@cuit.edu.cn

National Centers for Environmental Prediction (NCEP) reanalysis data. Results indicate that: (1) Both precipitation processes occurred in a southwest-northeast direction in the moisture convergence zone, and clouds were located in the southeast of the SWV. (2) Horizontally, the two precipitations processes consisted of a main precipitation rain band and several scattered precipitation clouds, and the rainfall intensity and scope of the TPV were much larger than those of the SWV. The common feature of these two mesoscale precipitation systems, detected by precipitation radar (PR), is that most of the precipitation was, which is characterized by a large scope and weak precipitation intensity. However, the contribution of convective rains to the total rainfall was much larger, and the ratio and contribution of convective precipitation to the total rainfall in the SWV was larger than it was in the TPV. (3) Vertically, the rain height in the two heavy precipitation systems increased with an increase in the surface precipitation rate, and the maximum rain height was close to 16 km. However, the rain height in the SWV was higher than that of the TPV, indicating weaker convective activity in the TPV. (4) The progress of collision and growth of raindrops and the latent heat release mainly occurred below a height of 8 km. But the change in the SWV precipitation was greater than that of TPV, and the SWV showed a greater total precipitation contribution than the TPV at a height layer of 8–12 km.

Keywords Southwest vortex, Tibetan Plateau vortex, TRMM satellite, Precipitation structure

1 引言

青藏高原低涡（简称高原涡）、西南低涡（简称西南涡）、高原切变线及高原低槽等均是在青藏高原热力、动力作用下产生的可造成灾害性天气的高原低值系统，陶诗言（1980）指出低层切变线和高原及其邻近地区的涡旋系统是中国夏季最重要的降水系统。西南低涡生成于青藏高原东南部，是对流层低层伴有气旋性环流的一种低值涡旋系统，它的发展及其东移能给高原邻近地区带来强降水天气（钱正安等，1990；乔全明和张雅高，1994；陈忠明等，2003）。高原低涡生成于青藏高原主体，是夏季高原 500 hPa 上的主要降水系统之一，在一定的环流形势下能东移发展影响高原邻近地区的降水（Tao and Ding, 1981）。因此四川盆地受到西南低涡和东移高原低涡的影响，极易发生暴雨、大暴雨天气。目前对西南低涡和高原低涡以及两低涡系统相互作用已做了不少研究（Wang and Orlanski, 1987；于波和林永辉，2008；宋雯雯等，2012）。Wang et al.（1993）通过研究青藏高原的中尺度涡旋系统表明发展成熟的西南低涡可以伸展到 300 hPa，温度廓线近湿绝热，风速很小，几乎无风切变。乔全明和张雅高（1994）指出盛夏时的高原低涡云型具有与热带气旋非常类似的螺旋结构。李国平和蒋静（2000）利用相平面分析法，重点分析了一类具有间断点的孤立波解的特征，从理论上论证了高原低涡具有与热带气旋类似的涡眼和暖心结构。尽管许多学者对西南低涡和高原低涡开展了大量研究，但是由于高原地形复杂导致观测资料的缺乏，对高原低涡和西南低涡降水三维结构以及降水

时空分布特征的认识还比较浅薄。

降水是水循环中一个至关重要的环节，是大气中最难探测的变量之一（Simpson et al., 1988）。随着携带第一部主动微波以及其他探测器的热带降雨测量卫星（Tropical Rainfall Measuring Mission, 简称 TRMM）的发射成功，使气象工作者能够对高原及其周边地区进行高分辨率的降水内部结构观测，为分析高原及周边降水的时空分布提供了新的途径。近年来，TRMM 卫星资料也被广泛用于热带、副热带的降水结构特征分析（李锐等，2005；Yokoyama and Takayabu, 2008；Toracinta et al., 2002）。傅云飞等（2003, 2005, 2012）利用 TRMM 资料研究了长江中下游两个降水系统的结构特征、中国东南部副热带高压下的热对流降水结构特征，还研究了亚洲夏季对流云和层云降水雨顶高度分布特征。李德俊等（2009, 2010）利用 TRMM 资料对高原周边降水结构进行研究分析。袁铁和鄯秀书（2010）利用 TRMM 卫星资料研究了华南飑线的闪电与降水结构的关系。

本文利用 TRMM 卫星资料对 2007 年 7 月 17 日发生在四川、重庆地区（简称川渝地区）的西南涡降水和 2008 年 7 月 21 日发生在四川东部高原降水的降水分布特征、对流云降水和层云降水的比例及其所处状态等降水结构特征、对降水中的雨顶高度分布特征以及降水廓线变化特点进行对比分析，从而找出两类低涡的共同特征与差异，为以后的低涡强降水诊断分析提供一个新的参考标准。

2 观测资料

TRMM 卫星搭载了五个探测器，分别是降水雷

达 PR (Precipitation Radar) /2A25、微波成像仪 TMI (Microwave Imager) /1B11、可见光和红外扫描仪 VIRS (Visible and Scanner) /1B01、闪电成像仪 LIS (Visible Infrared Scanner)、云和地球辐射系统 CERES (Clouds and the Radiant Energy System), 其中降水雷达、微波成像仪、可见光和红外扫描仪是测量降水的主要仪器。PR/2A25 产品提供了逐条轨道上的降水类型、降水率等信息, 其水平分辨率为 4.3 km, 垂直分辨率为 0.25 km, 为分析降水三维结构特征提供了有利条件。TMI/1B11 产品提供了每个像素各个通道的水相和冰相粒子的微波辐射亮温值。VIRS/1B01 能提供五个通道的云顶辐射温度 (Kummerow et al., 1998)。TRMM 卫星发射的主要目的是测量热带、副热带地区降水和潜热释放的分布及其变化, 利用卫星资料来研究强降水结构特点, 可以弥补地基观测的不足, 是认识强降水系统发生发展规律的方法之一。由于 TRMM 卫星运行轨道与赤道平面成 35° 角, 是一颗非太阳同步卫星, 每天不定点、不定时扫描 $38^\circ\text{S}\sim 38^\circ\text{N}$ 的范围, 要找到与 TRMM 资料时空匹配较好的的个例及天气系统发展过程, 存在一定的难度; 且 TRMM 卫星资料在高原及其周边地区应用的研究较少, 至于更加全面的探测效果评估, 还需要通过更多的观测资料应用加以验证。TRMM 卫星资料的研究已经引起我国学者的重视, Zhou et al. (2008) 利用遥感信息中心估算的降水资料、TRMM 卫星 3B42 产品、地面雨量计资料对比分析了东亚夏季风区域降水特点, 且利用模式的相关系数和均方根误差等指标证实了 TRMM 卫星资料和地面雨量计观测资料相似度很高。Mao and Wu (2012) 利用 1998~2008 年 TRMM 卫星资料研究了我国乃至整个亚洲季风区夏季降水的气候变化特征, 这对于 TRMM 卫星资料的应用具有极大的参考价值。本文所使用的 TRMM 资料是由美国宇航局地球科学数据和信息中心提供的 RP 探测结果处理和反演得到的标准产品 2A25、1B11 (第 6 版)。值得指出的是目前 TRMM 资料已更新到第 7 版本, 2A25 从第 6 版本数据到第 7 版本的主要变化是许多变量从以前的整型数变为浮点数, 更多产品的区别请参见网站 <http://pps.gsfc.nasa.gov/Documents/formatChangesV7.pdf> [2013-09-01]。

在 2007 年 7 月 17 日西南涡暴雨天气过程中, TRMM 卫星捕获到的时次是 2007 年 7 月 17 日 08:34

(记为 A 时刻; 北京时, 下同), 轨道号为 55083, 正好对应西南涡降水发展旺盛阶段。在 2008 年 7 月 21 日高原涡区域性暴雨天气过程中, TRMM 卫星捕获到的时次是 2008 年 7 月 21 日 08:23 (记为 B 时刻), 轨道号是 60850, 恰好对应高原涡降水发展旺盛阶段。两次过程降水雨量大, 强降水范围集中, 区域强降水特征比较典型, 因此本文选用这两个时次的 TRMM 卫星资料来对比分析这两次低涡降水过程中的降水三维结构特征、雨顶高度以及降水廓线等结构特征, 期望能为丰富我们对高原涡和西南涡降水结构的认识提供帮助。而研究两涡降水云和降水结构特征的异同, 对于了解西南暴雨成因及发展演变具有重要意义。

3 天气过程和环流形势

本文分析的两个例分别是 2007 年 7 月 16~20 日四川东部和重庆西部出现的一次持续性特大暴雨过程 (简称西南涡降水) 和 2008 年 7 月 20~22 日由高原低涡东移引发四川盆地自西向东出现的一次区域性暴雨过程 (简称高原涡降水)。在西南涡降水过程中, 17 日 08:00 及之后一直维持在四川盆地上空, 暴雨落区几乎覆盖了整个四川盆地, 降水从盆地西部逐渐东移, 17 日 02:00 到 18 日 02:00 为最强降水时段。高原涡降水过程中, 低涡于 20 日晚移出高原, 21 日东移进四川盆地且移动缓慢出现停滞现象, 四川大部分地区出现明显降水; 21 日强降水中心位于盆地东部, 58 个乡镇降雨量在 100~249.9 mm, 95 个乡镇降雨量在 50~100 mm。

为了进一步分析 TRMM 卫星扫描到的两次低涡降水过程发生时的环流形势, 我们利用 NCEP (National Centers for Environmental Prediction) 再分析资料分别绘制了两次降水过程 700 hPa、500 hPa 风场、高度场和水汽通量图, 并叠加了 TRMM/ PR 探测的 3.5 km 高度的降水率水平分布 (图 1、图 2)。图中清楚表明高原涡和西南涡降水中的降水云群都位于低涡的东南方, 高原涡中降水云团略微偏南; 强降水均发生在槽前强盛的偏南气流中, 从水汽通量图中也可看出两次暴雨均发生在西南—东北向的水汽辐合带中, 其带来大量的水汽和能量, 十分有利于形成强降水。从天气动力学理论上来分析, 低涡的东南侧常位于副热带高压西缘的西南低空急流中, 水汽输送旺盛, 水平辐合和上升运动强。又因风速大, 低涡南侧的曲率涡度 (V/R_s , 其中 V

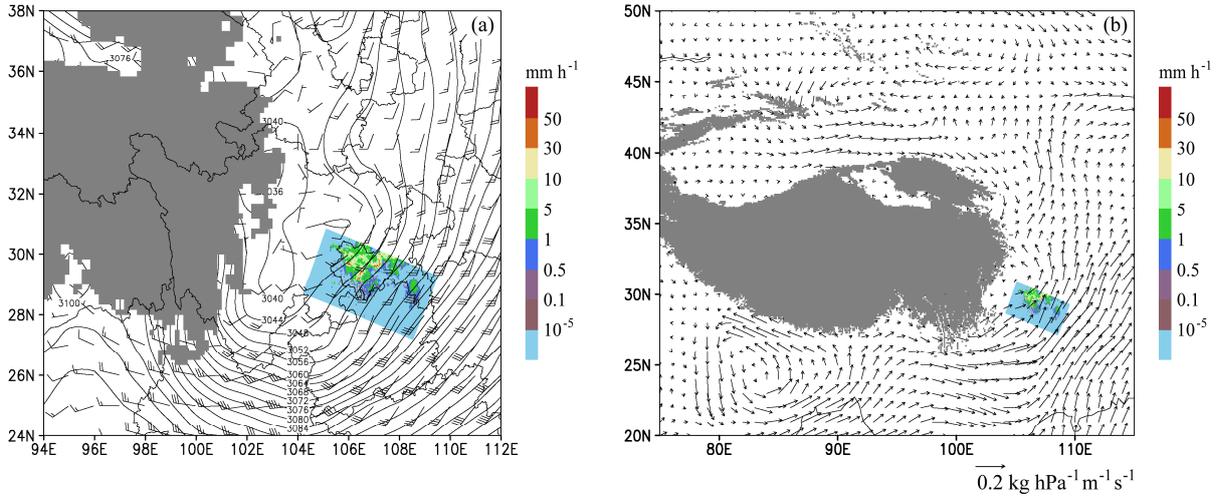


图1 2007年7月17日08:34(北京时,下同)TRMM(Tropical Rainfall Measuring Mission)/PR(Precipitation Radar)探测的(a)3.5 km高度上的降水率(单位: mm h^{-1})与当时700 hPa风场与高度场(单位: dagpm)叠加图以及(b)水汽通量(单位: $\text{kg hPa}^{-1} \text{m}^{-1} \text{s}^{-1}$)。(a)中阴影区表示地形高度超过3000 m, (b)中阴影区表示青藏高原地形

Fig. 1 The precipitation rate at (a) 3.5 km from TRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission)/ PR (Precipitation Radar) detection with the 700-hPa wind field and height field superposition and (b) moisture flux at 0834 (Beijing time, the same below) on July 17, 2007. The shadow show the height over 3000 m in (a), the shadow show Qinghai-Tibet Plateau in (b)

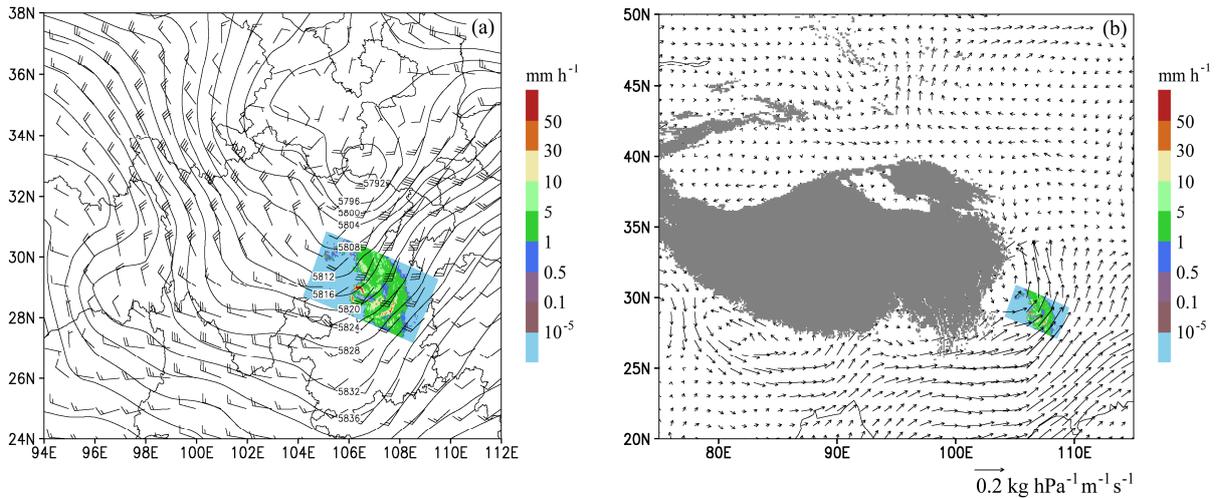


图2 2008年7月21日08:23 TRMM/PR探测的(a)3.5 km高度上的降水率(单位: mm h^{-1})与当时500 hPa风场与高度场(单位: dagpm)叠加图以及(b)水汽通量(单位: $\text{kg hPa}^{-1} \text{m}^{-1} \text{s}^{-1}$)。(b)中阴影区表示青藏高原地形

Fig. 2 The precipitation rate at (a) 3.5 km from TRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission)/ PR (Precipitation Radar) detection with the 500 hPa wind field and height field superposition and (b) moisture flux at 0823 on July 21, 2008. The shadow show Qinghai-Tibet Plateau in (b)

表示速度, R_s 为曲率半径)大, 导致正涡度(气旋式涡度)也大。则辐合气流挟卷水汽旋转上升, 在高空遇冷凝结降落, 因此在低涡的东南方易出现较强的降水。

4 降水结构分析

4.1 降水的水平结构

以往研究表明(何文英和陈洪滨, 2006; 傅云

飞等, 2007; 何会中等, 2006)垂直极化微波辐射亮温较低之处降雨云中冰水粒子含量多, 对应着较为强烈的降雨过程。考虑到 TRMM/TMI 提供的分辨率最高的是 85 GHz 亮温图像(游然等, 2011), 而川渝地区地形复杂, 3.5 km 高度以下地表对 PR 回波会造成干扰。因此图 3 给出了西南涡降水(图 3a、c)和高原涡降水(图 3b、d)过程中 TMI 探测到的降水云系的 85 GHz 微波辐射亮温以及

TRMM/PR 扫描到的 3.5 km 高度处的降水分布。从图 3a、b 中可看出两次降水过程中降水旺盛阶段，微波亮温均呈片状分布，有大片区域的微波亮温值都低于 250 K，位于降水云系之上，呈东北—西南走向，说明两次降水过程的降水云系中存在大量非均匀、非对称但相对比较集中分布的冰水粒子从而导致对流活动比较旺盛，也进一步说明降水发生在强盛的西南气流中。不同之处是西南涡降水中微波亮温值低于 225 K 的区域比高原涡降水大且更集中，最低可达 135 K，说明冰水粒子含量多的区域更大。

由于 TMI 扫描宽度为 758.5 km，PR 的轨道宽度为 220 km，因此轨道宽度比 PR 的宽。对比 A、B 两个时刻的微波辐射亮温和降水率水平分布图（图 3c、d）可知，两次降水过程的亮温与降水率

分布无论在量值和走向趋势上都有很好的对应关系，亮温偏低之处有强降水发生并且亮温越低的区域降水越强，因为降水云中的冰水粒子含量越多，散射信号越强，微波亮温越低，这与何会中等（2006）分析台风“鲸鱼”时得出的微波亮温与降水分布之间关系时的结论一致。从图 3c、d 中还可看出这两次降水过程的降水系统均是由一个主降水雨带和多个零散降水云团组成，降水范围大且相对集中，主降水云团上的最大降水率都超过了 50 mm h^{-1} ，而高原涡降水中最大降水率超过了 100 mm h^{-1} ，不同之处是高原涡降水的水平范围比西南涡降水要大，A 时刻主降水雨带的南北范围接近 200 km，降水强度在 10 mm h^{-1} 以上的强降水云团水平范围在 10~30 km 之间，而 B 时刻主降水雨带的南北范围大约为 270 km，降水强度在 10 mm h^{-1} 以上的

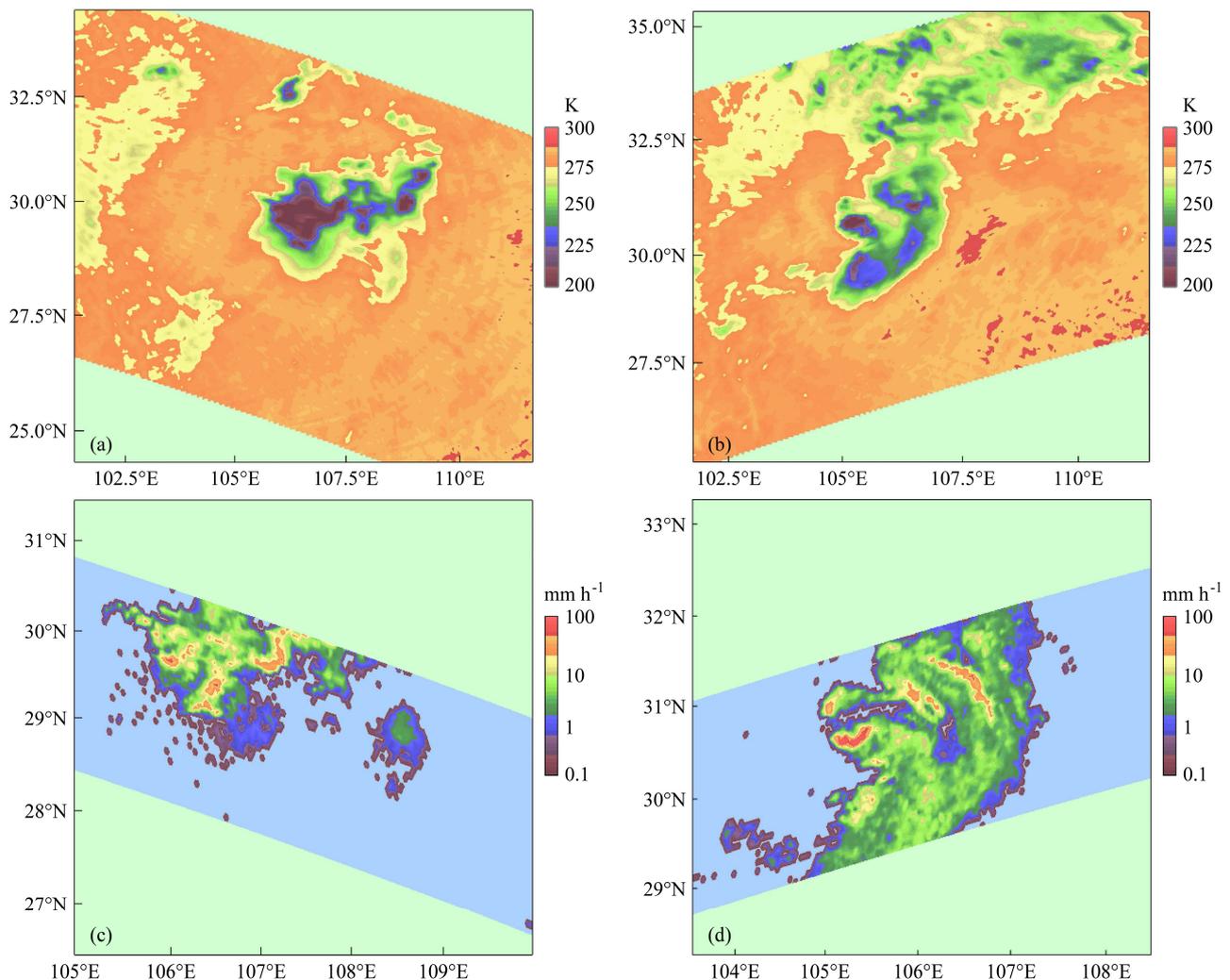


图3 (a、b) TRMM/TMI 探测的 85 GHz 微波辐射亮温 (单位: K) 以及 (c、d) PR 捕获到的 3.5 km 高度处的地表降水率分布: (a、c) A 时刻; (b、d) B 时刻

Fig. 3 (a, b) 85-GHz microwave radiation (K) from TRMM/TMI detection and (c, d) the precipitation rate at 3.5 km from PR detection: (a, c) A; (b, d) B

强降水云团水平范围在 10~60 km 之间。

对流系统通常伸展的很高,中尺度降水系统中层云降水和对流降水所占比例间接性地指示了潜热释放的垂直廓线,通常较低的对流云比例意味着冰粒子逐渐变为层状云区 (Houze, 1982, 1989)。利用 TRMM/PR 探测到的降水廓线资料,我们分析了西南涡和高原涡两次强降水过程中降水旺盛期的对流云和层云降水的像素比例、总降水比例及其平均降水率,试图进一步揭示降水系统中降水性质及其所处状态 (表 1)。从表中可发现,无论是西南涡还是高原涡降水区域,均是层云降水所占比例比对流降水大,两次强降水过程在发展旺盛阶段均以降水范围大、强度弱的层云降水为主,对流降水次之,但对流降水对总降水率的贡献很大都达到了 60%,接近 40% 层云降水贡献于总降水,这不同于何会中等 (2006) 研究台风“鲸鱼”时指出的层云降水贡献率要高于对流降水。从两次降水过程的平均降水率可发现,尽管对流降水占的面积小,但平均降水率远大于层云降水,对流降水的平均降水率在西南涡降水区是层云降水的 6.7 倍,在高原涡中是层云降水的 5.3 倍,可见高原及周边地区的降水过程中对流性降水和层云降水的比例要明显高于热带海洋地区 (3.3 倍) (Schumacher and Houza, 2003)。这可能是因为高原降水系统比热带地区降水系统的强降水云团中具有更强的上升气流,对流活动更旺盛,从而产生更强的对流降水。不同之处是西南涡降水中对流降水所占比例比高原涡的大,对总降水率的贡献也大,但平均降水率不及高原涡降水。

表 1 TRMM/PR 探测到的降水廓线资料计算的西南涡和高原涡中对流云和层云降水的像素和总降水比例及其平均降水率

Table 1 Pixel, total precipitation rate and mean precipitation rate of convection and stratiform cloud in the southwest vortex and the Tibetan Plateau vortex calculated with precipitation profile of TRMM/PR detection

降水类型	像素比例	总降水率比例	平均降水率/ mm h ⁻¹	
			降水类型	像素比例
西南涡降水	对流降水	0.21	0.64	11.9
	层云降水	0.79	0.36	1.8
高原涡降水	对流降水	0.18	0.60	14.7
	层云降水	0.82	0.40	2.8

4.2 降水的垂直结构

TRMM 卫星搭载的测雨雷达 (PR) 探测到的降水率最高层的高度定义为降水高度,它能反映降

水云团在垂直方向上的发展变化程度。根据垂直 V 方法 (Awaka et al., 1998) 和水平 H 方法 (Steiner et al., 1995), PR 标准产品 2A25 提供三种类型降水: 对流降水、层云降水和其他类型降水。由于其他类型降水所占比例小,且雨顶高度变化范围太小,仅有 0.5 km 的波动,因此图 4 仅给出近地面 (3.5 km 处) 在不同地表雨强条件下西南涡和高原涡对流降水、层云降水以及总降水平均雨顶高度的变化。从图 4 中可发现,无论是对流降水、层云降水还是总降水,高原涡和西南涡引发强降水的平均雨顶高

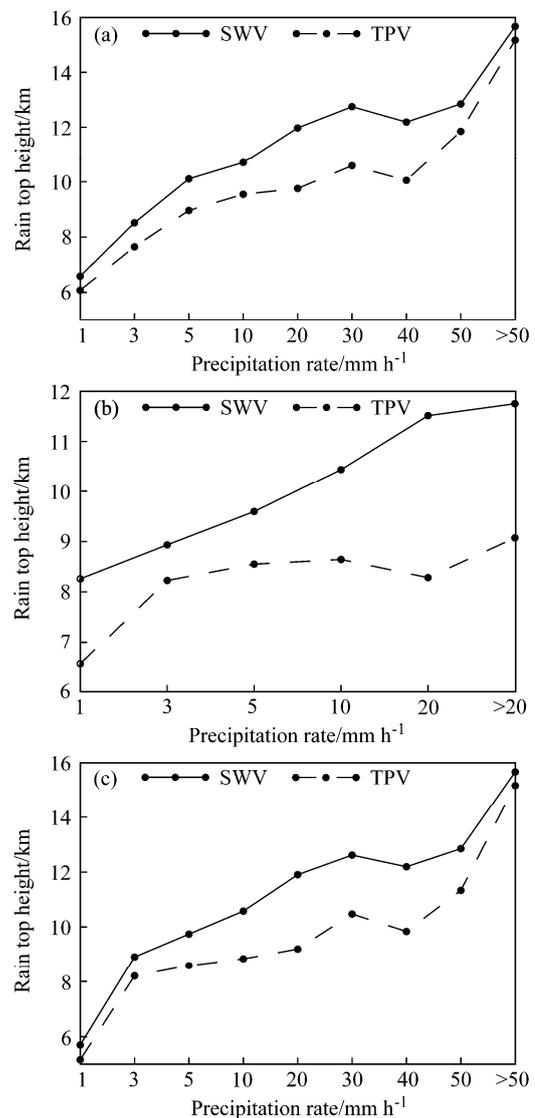


图 4 不同地表雨强条件下西南涡降水和高原涡降水的雨顶高度分布: (a) 对流降水; (b) 层云降水; (c) 总降水

Fig. 4 The rain top height distribution of the southwest vortex (SWV) and the Tibetan Plateau vortex (TPV) precipitation under different surface rainfall intensity: (a) Convective precipitation; (b) stratiform precipitation; (c) total precipitation

度均是随着地面平均雨强的增加而增加，即地表雨强越大，雨顶高度越高，降水云中上升运动越强，仅在 30 mm h^{-1} 到 40 mm h^{-1} 范围内雨顶高度有小幅度下降。层云降水的雨顶高度和对流降水的雨顶高度存在一定的差异，两涡中对流降水和总降水的雨顶高度范围接近，差别不是很大，分布在 $5 \sim 16 \text{ km}$ 范围内。但在层云降水中，两涡雨顶高度的范围相差较大，西南涡强降水系统的雨顶高度约在 $8 \sim 12 \text{ km}$ 范围内，而高原涡强降水系统的雨顶高度分布在 $5 \sim 9 \text{ km}$ ，从图中还可看出，三类降水中，高原涡强降水系统的雨顶高度都比西南涡偏低。究其原因，可能主要与地形有关，高原涡生成于青藏高原主体，而西南涡多形成于川西高原及四川盆地，则成熟期的西南涡正涡度柱可伸展到 300 hPa ，相对于高原涡是一个深厚系统（陈忠明等，2004），上升气流强，正涡度柱伸展得比较高。值得提出的本文研究的两个低涡降水系统中的对流降水的最大雨顶高度均比傅云飞等（2003, 2005）研究的热对流降水、1998 年 7 月 20 日（简称“98.7.20”）发生在武汉附近的中尺度强降水的最大雨顶高度更高。

图 5 给出了 PR 探测范围内所有像素雨顶高度的水平分布，可以更直观的分析所有像素的雨顶高度情况。从图中可看出，西南涡降水的最大雨顶高度比高原涡降水的雨顶高度高，西南涡降水中绝大部分像素的雨顶高度分布在 $8 \sim 14 \text{ km}$ 范围内，高原涡降水中绝大部分像素雨顶高度则分布在 $8 \sim 12 \text{ km}$ 范围内，高原涡和西南涡系统边缘降水的雨顶高度则多分布在 $4 \sim 8 \text{ km}$ 。无论是高原涡还是西南涡降水，两个降水系统雨顶高度的大值区与降水的大值区对应较好，通过分析雨顶高度在 14 km 以上的区域对应着降水在 50 mm h^{-1} 以上的大值区，说明此处水汽充沛、上升运动强从而导致对流旺盛，云体被抬升的很高。但是降水大值区的雨顶高度不一定高，降水较弱的地区对应着较低雨顶高度。不同降水系统的雨顶高度分布有异同，同一降水系统所有像素的雨顶高度分布有差异。这与傅云飞等（2012）利用 TRMM/PR 资料分析中国东部大陆和东海的两个降水系统雨顶高度平面分布的结果类似，即不同降水系统和同一降水系统的雨顶高度分布均存在差异。

进一步比较两低涡系统对流降水和层云降水雨顶高度平面分布特征（图 4c、d、e、f）可发现，无论是西南涡还是高原涡降水，对流降水的雨顶高

度均比层云降水高，但西南涡中对流降水最大雨顶高度可达 15.5 km ，高原涡中对流降水最大雨顶高度略小为 14.25 km ，而两低涡系统层云降水雨顶高度都低于 14 km ，仍是西南涡中层云降水中最大雨顶高度高于高原涡，说明西南涡降水过程中对流旺盛程度强于高原涡。

4.3 降雨率垂直廓线

降水廓线有助于了解降水云团的动力、热力和微物理的垂直结构特征。Liu and Fu（2001）通过对 1998 年的 TRMM/PR 资料主成分分析表明，给定降水类型和地表降水率，平均廓线能代表 80% 的典型降水廓线变化特点。图 6 分别绘制了西南涡和高原涡降水在 3.5 km 高度处的对流降水（图 6a、c）和层云降水（图 6b、d）平均廓线分布，有利于对比分析两次降水过程的降水强度随高度的变化特点。

两次降水过程的对流降水廓线在 8 km 以下随高度降低而增加，中高层降雨率很低，表明强烈的雨滴碰并增长过程、降水释放的潜热主要集中在高度以下，水汽输送较强，云水含量最为集中，冰相粒子变化最为复杂； 8 km 高度以上，高原涡比西南涡降水廓线更陡峭，说明后者降水率的变化在同样高度的情况下大于前者，因此释放的潜热也更多。从图中还可看出，西南涡降水中对流云降水最大雨顶高度高于高原涡，且在高层还有可观降水，可见西南涡降水系统中气流上升运动更强，将大量降水粒子抬至中高层形成尺度较大的固态降水粒子因而含有更多冰晶。两次降水过程的层云降水廓线中，降水强度随高度增加而减少，在 $5 \sim 6 \text{ km}$ 减小最多，表明水汽稳定的凝结增长是层云降水的主要来源，差别不是很大，但仍可发现在 8 km 以上，高原涡降水随高度增加迅速减小趋于零。从而表明西南涡较高原涡来说是一个相对深厚的系统，这一特征从 4.1 节揭示的西南涡降水中对流降水所占比例比高原涡大的结果也可以看出。

4.4 不同高度范围降水量贡献的百分比分布

通过对降水廓线的分析，将 TRMM/PR 探测的垂直方向上的降水率分为三个高度范围，分别是： $3.5 \sim 8 \text{ km}$ 、 $8 \sim 12 \text{ km}$ 、 12 km 以上，分别绘制了西南涡和高原涡中对流云降水和层云降水在不同地表雨强条件下三个高度层的降水量对总降水量贡献的百分比变化，以进一步分析两涡的异同点（图 7）。从图中可发现，西南涡和高原涡降水中均是 $3.5 \sim 8 \text{ km}$ 高度层范围降水量是地面降水的重要

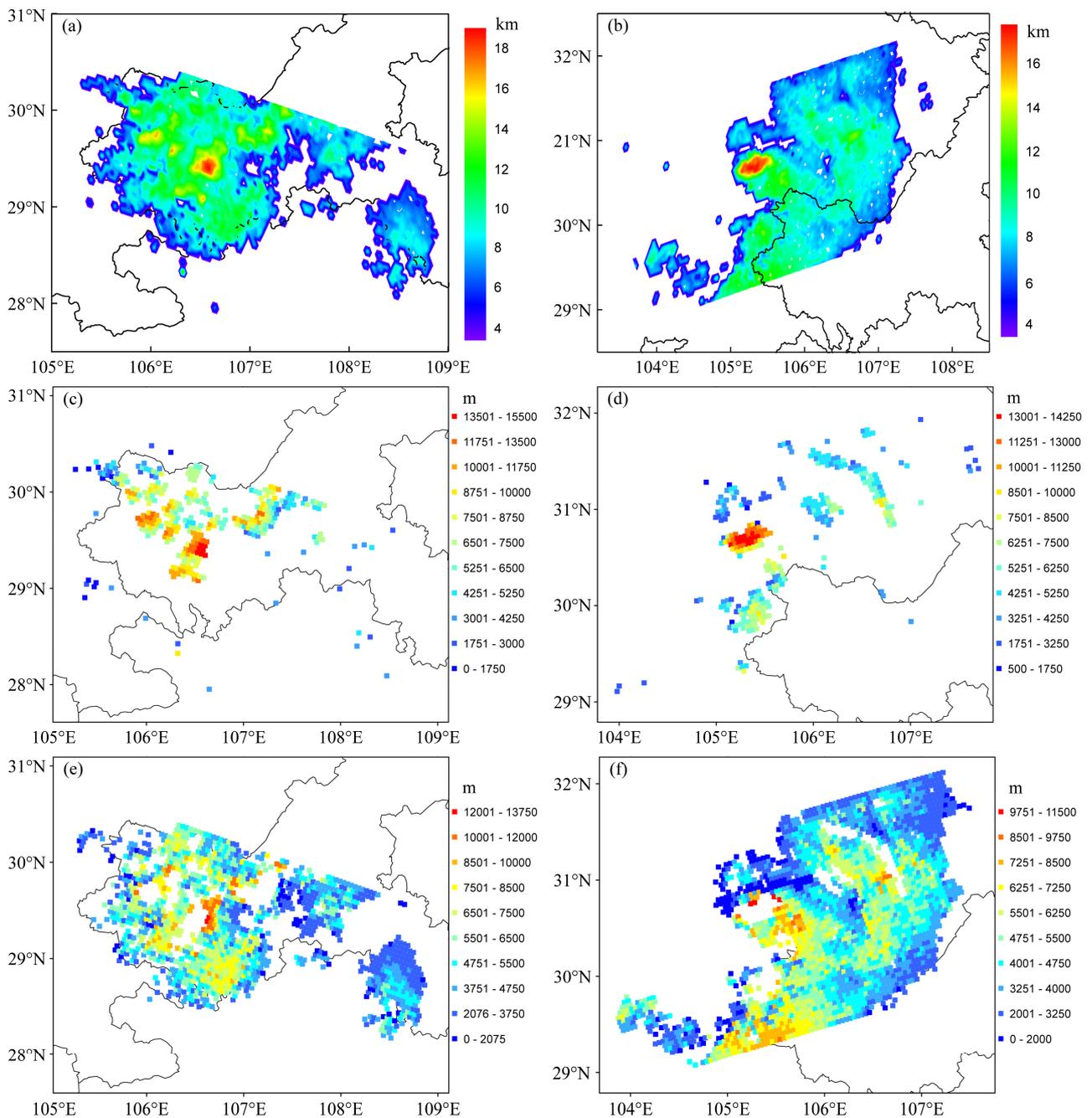


图5 TRMM/PR 探测的西南涡降水(左列)和高原涡降水(右列)雨顶高度的水平分布:(a, b)总降水;(c, d)对流降水;(e, f)层云降水
Fig. 5 The rain top height horizontal distribution of SWV and TPV precipitation by TRMM/PR: (a, b) Total precipitation; (c, d) convective precipitation; (e, f) stratiform precipitation

来源,含水量贡献最大,且随着降水强度的增加变化不是很大。8~12 km 高度层降水量对总降水贡献随着地表雨强的增大呈减少趋势,在 50 mm h^{-1} 以上又变得很大,但是西南涡降水中在此高度层的降水量对总降水量的贡献总体要比高原涡中大,最大贡献可达 18%,而高原涡最大达 12%,这表明对流降水主要形成于中低层的大粒子碰并增长以及

冰相粒子融化作用,且西南涡中降水云高度比高原涡中的高。12 km 以上降水量在两涡降水中对总降水量的贡献百分比均很小,这与降水廓线分析一致。两涡的层云降水中不同高度降水量对总降水量的贡献也有类似对流降水的特征。以上分析可知,两涡的降水强盛阶段,中低层降水是柱降水的主要来源。这不同于何会中等(2006)分析冰雹降水过

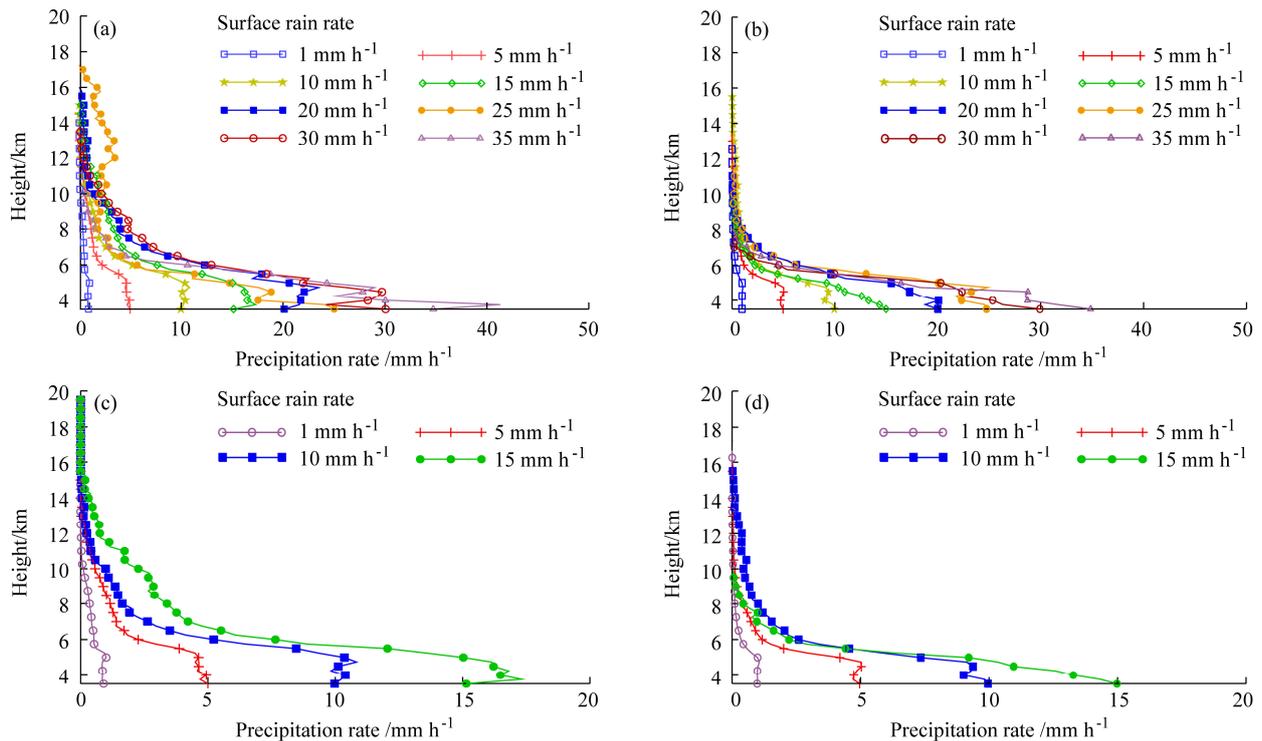


图 6 (a、c) 西南涡和 (b、d) 高原涡中 (a、b) 对流降水以及 (c、d) 层云降水的平均廓线
 Fig. 6 The mean profile of (a, b) convective precipitation and (c, d) stratiform precipitation in (a, c) SWV and (b, d) TPV

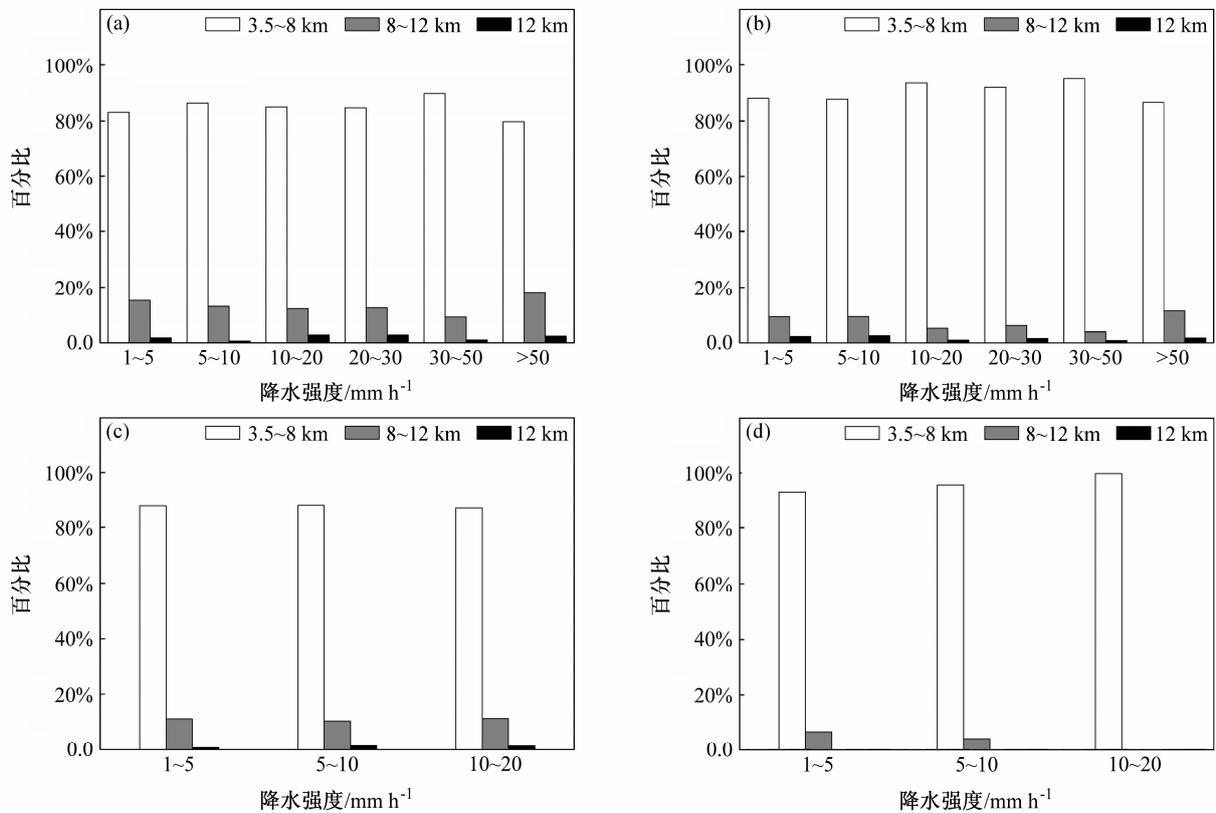


图 7 (a、c) 西南涡和 (b、d) 高原涡中不同高度层的降水量在不同地表雨强条件下对总降水量贡献的百分比变化：(a、b) 对流降水；(c、d) 层云降水
 Fig. 7 The change of different height level precipitation contribution to total precipitation in (a, c) SWV and (b, d) TPV under different surface rainfall intensity: (a, b) Convective precipitation; (c, d) stratiform precipitation

程时指出的对流云发展强盛阶段, 中高层降水量是地面降水的主要来源。

5 小结

本文利用 TRMM 卫星和 NCEP 再分析资料, 研究了 2007 年 7 月 17 日发生在川渝地区由西南涡引发的强降水和 2008 年 7 月 21 日发生在四川东部由高原涡东移引发的强降水过程, 重点对比分析了两个低涡降水系统的水平和垂直结构特征, 以及两者在降水雨顶高度、降水廓线特征等方面的异同。得到以下结果:

(1) 高原涡和西南涡强降水中的降水云群均位于低涡的东南方, 并且强降水均发生在西南—东北向的水汽辐合带中。

(2) 就降水的水平结构而言, 两次过程中降水系统均是由一个主降水雨带和多个零散降水云团组成, 降水范围大。高原涡降水旺盛阶段的降水范围比西南涡的大, 且降水在 10 mm h^{-1} 以上的强降水范围为 $10 \sim 60 \text{ km}$, 但西南涡降水中云水粒子含量多的区域更大, 强降水的范围也更大。PR 探测到的两次强降水过程均是以范围大、强度弱的层云降水为主, 几乎占 80%。但对流降水的平均降水率是层云降水的 5 倍以上, 对总降水率的贡献也较大。西南涡降水中, 虽然平均降水率偏小, 但对流降水所占比例比高原涡大, 对总降水率的贡献也较大。

(3) 在降水的垂直结构上, 两次降水过程中无论是对流降水、层云降水还是总降水, 高原涡和西南涡降水旺盛阶段的平均雨顶高度均随地表雨强的增加而增大, 且最大雨顶高度均接近 16 km , 高于一般的热对流降水和中小尺度强降水。雨顶高度的大值区与降水区域大值区对应较好, 西南涡强降水系统的雨顶高度比高原涡的更高。

(4) 降水廓线表明: 两次降水过程中雨滴碰并增长过程、凝结潜热的释放以及冰相粒子复杂相变过程主要集中在 8 km 高度以下, 且此高度以下的降水量是地面降水的重要来源。随着高度和地表雨强的增加, 降水量对总降水量的贡献均呈减少的趋势。但在 8 km 以上, 西南涡中降水率的变化在变化同样高度的情况下大于高原涡, 且前者在 $8 \sim 12 \text{ km}$ 高度层的降水量对总降水量贡献百分比大于后者。这表明成熟阶段的西南涡可发展为一个较为深厚的系统, 而高原涡则是一个相对浅薄的

系统。

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 radar [C]// Proceedings of the 8th URSI Commission F Open Symposium. Aveiro, Portugal, 134–146.
- 陈忠明, 徐茂良, 闵文彬, 等. 2003. 1998 年夏季西南低涡活动与长江上游暴雨 [J]. 高原气象, 22 (2): 162–167. Chen Zhongming, Xu Maoliang, Min Wenbin, et al. 2003. Relationship between abnormal activities of southwest vortex and heavy rain the upper reach of Yangtze River during summer of 1998 [J]. Plateau meteorology (in Chinese), 22 (2): 162–167.
- 陈忠明, 闵文彬, 缪强, 等. 2004. 高原涡与西南涡耦合作用的个例诊断 [J]. 高原气象, 23 (1): 75–80. Chen Zhongming, Min Wenbin, Miao Qiang, et al. 2004. A case study on coupling interaction between plateau and southwest vortices [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 23 (1): 75–80.
- 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 [J]. 气象学报, 61 (4): 421–431. Fu Yunfei, Yu Rucong, Xu Youping, et al. 2003. Analysis on precipitation structures of two heavy rain cases by using TRMM PR and TMI [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 61 (4): 421–431.
- 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 [J]. 气象学报, 63 (5): 750–761. Fu Yunfei, Feng Jingyi, Zhu Hongfang, et al. 2005. Structures of a thermal convective precipitation system happened in controlling of the western subtropical pacific high [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 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 [J]. 气象学报, 65 (3): 316–327. Fu Yunfei, Liu Dong, Wang Yu, et al. 2007. Characteristics of precipitating and non-precipitating clouds in typhoon rana as viewed by TRMM combined measurements [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 65 (3): 316–327.
- 傅云飞, 曹爱琴, 李天奕, 等. 2012. 星载测雨雷达探测的夏季亚洲对流与层云降水雨顶高度气候特征 [J]. 气象学报, 70 (3): 436–451. Fu Yunfei, Cao Aiqin, Li Tianyi, et al. 2012. Climatic characteristics of the storm top altitude for the convective and stratiform precipitation in summer Asia based on measurements of the TRMM precipitation on radar [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 70 (3): 436–451.
- 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 [J]. 大气科学, 30 (3): 491–503. He Huizhong, Cheng Minghu, Zhou Fengxian. 2006. SD structure of rain and cloud hydrometeors for typhoon Kujira [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 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 [J]. 气象学报, 64 (3): 364–375. He Wenying, Chen Hongbin. 2006. Analyses of evolutionary characteristics of a hailstorm precipitation from TRMM observations [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 64 (3): 364–375.

- Houze R A Jr. 1982. Cloud clusters and large-scale vertical motions in the tropics [J]. *J. Meteor. Soc. Japan*, 60 (1): 396–410.
- Houze R A Jr. 1989. Observed structure of mesoscale convective systems and implications for large-scale heating [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 115 (487): 425–461.
- Kummerow C, Bames W, Kozu T, et al. 1998. The tropical rainfall measuring mission (TRMM) sensor package [J]. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 15 (3): 809–817.
- 李国平, 蒋静. 2000. 一类奇异孤波解及其在高原低涡结构分析中的应用 [J]. *气象学报*, 58 (4): 447–455. Li Guoping, Jiang Jing. 2000. A type of singular solitary wave and its application of structure analysis of the Tibetan Plateau vortex. [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, (in Chinese) 58 (4): 447–455.
- 李锐, 傅云飞, 赵萍. 2005. 热带测雨卫星的测雨雷达对 1997/1998 El Niño 后期热带太平洋降水结构的研究 [J]. *大气科学*, 29 (2): 225–235. Li Rui, Fu Yunfei, Zhao Ping. 2005. Characteristics of rainfall structure over the tropical pacific during the later period of 1997/1998 El Niño derived from TRMM PR observations [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 29 (2): 225–235.
- 李德俊, 李跃清, 柳草, 等. 2009. 利用 TRMM 卫星资料对“07.7”川南特大暴雨的诊断研究 [J]. *暴雨灾害*, 28 (3): 235–240. Li Dejun, Li Yueqing, Liu Cao, et al. 2009. Study on the “07.7” mesoscale torrential rain in South Sichuan based on TRMM observations [J]. *Torrential Rain and Disasters (in Chinese)*, 28 (3): 235–240.
- 李德俊, 李跃清, 柳草, 等. 2010. 基于 TRMM 卫星探测对宜宾夏季两次暴雨过程的比较分析 [J]. *气象学报*, 68 (4): 559–568. Li Dejun, Li Yueqing, Liu Cao, et al. 2010. Comparative analysis between two summer heavy rain events in Yibin based on the TRMM data [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 68 (4): 559–568.
- Liu G S, Fu Y F. 2001. The characteristics of tropical precipitation profiles as inferred from satellite radar measurements [J]. *J. Meteor. Soc. Japan*, 79 (1): 131–143.
- Mao J Y, Wu G X. 2012. Diurnal variations of summer precipitation over the Asian monsoon region as revealed by TRMM satellite data [J]. *Sci. China Earth Sci.*, 55 (4): 554–566.
- 钱正安, 顾弘道, 颜宏, 等. 1990. 四川“81.7”特大暴雨和西南涡的数值模拟 [J]. *气象学报*, 48 (4): 415–423. Qian Zheng'an, Gu Hongdao, Yan Hong, et al. 1990. Numerical simulations of extremely intense rainstorm and southwest vortex over Sichuan in July of 1981 [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 48 (4): 415–423.
- 乔全明, 张雅高. 1994. 青藏高原天气学 [M]. 北京: 气象出版社, 156. Qiao Quanming, Zhang Yagao. 1994. *Synoptic meteorology of the Tibetan Plateau (in Chinese)* [M]. Beijing: China Meteorological Press, 156.
- 宋雯雯, 李国平, 唐钱奎. 2012. 加热和水汽对两例高原低涡影响的数值试验 [J]. *大气科学*, 36 (1): 117–129. Song Wenwen, Li Guoping, Tang Qiankui, 2012. Numerical simulation of the effect of heating and water vapor on two cases of plateau vortex [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 36 (1): 117–129.
- 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.*, 34 (9): 1978–2007.
- Simpson J, Adler R F, North G R. 1988. A proposed Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) satellite [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 69 (3): 278–295.
- Schumacher C, Houze R A Jr. 2003. Stratiform rain in the tropics as seen by the TRMM precipitation radar [J]. *J. Climate*, 16 (11): 1739–1756.
- 陶诗言. 1980. 中国之暴雨 [M]. 北京: 科学出版社, 36. Tao Shiyan. 1980. *The Torrential Rain in China (in Chinese)* [M]. Beijing: Science Press, 36.
- Toracinta E R, Cecll D J, Zipser E J, et al. 2002. Radar, passive microwave, and lightning characteristics of precipitating systems in the tropics [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 130 (4): 802–824.
- Tao S Y, Ding Y H, 1981. Observational evidence of the influence of the Qinghai–Xizang (Tibet) Plateau on the occurrence of heavy rain and severe convection storms in China [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 62 (1): 23–30.
- Wang B, Orlanski I. 1987. Study of a heavy rain vortex formed over the eastern flank of the Tibetan Plateau [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 115 (7): 1370–1393.
- Wang W, Kuo Y, Thomas T W. 1993. A diabatically driven mesoscale vortex in the lee of the Tibetan Plateau [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 121 (9): 2542–2561.
- 于波, 林永辉. 2008. 引发川东暴雨的西南低涡演变特征个例分析 [J]. *大气科学*, 32 (1): 141–154. Yu Bo, Lin Yonghui. 2008. A case study of southwest vortex causing heavy rainfall in eastern Sichuan basin [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 32 (1): 141–154.
- 袁铁, 郗秀书. 2010. 基于 TRMM 卫星对一次华南飚线的闪电活动及其降水结构的关系研究 [J]. *大气科学*, 34 (1): 58–70. Yuan Tie, Xie Xiushu. 2010. TRMM-based study of lightning activity and its relationship with precipitation structure of a squall line in South China [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 32 (1): 141–154.
- 游然, 卢乃锰, 邱红, 等. 2011. 用 PR 资料分析热带气旋卡特里娜降水特征 [J]. *应用气象学报*, 22 (2): 203–213. You Ran, Lu Naimeng, Qiu Hong, et al. 2011. Precipitation characteristics in tropical cyclone Katrina using TRMM precipitation radar [J]. *J. Appl. Meteor. Science (in Chinese)*, 22 (2): 203–213.
- Yokoyama C, Takayabu Y N. 2008. A statistical study on rain characteristics of tropical cyclones using TRMM satellite data [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 136 (10): 3848–3862.
- Zhou T J, Yu R C, Chen H M, et al. 2008. Summer precipitation frequency, intensity, and diurnal cycle over China: A comparison of satellite data and rain gauge observation [J]. *J. Climate*, 21 (16): 3997–4010.