

高原涡与西南涡相互作用引发暴雨过程及云系特征分析

蒲学敏¹ 白爱娟^{1,2} 毛晓亮^{1,2,3}

(1 成都信息工程大学大气科学学院, 成都 610225; 2 三亚市气象局, 三亚 572000; 3 中国气象局成都高原气象研究所, 成都 610072)

摘要: 使用中国新一代FY-4A卫星、GPM卫星的降水雷达等多源观测数据, 选择两次高原涡与西南涡相互作用的暴雨个例, 分析了两涡作用下盆地中尺度降水云系的空间结构特征。结果表明: 西南涡与高原涡耦合作用下产生中尺度对流复合体MCC云系, 短时强降水主要发生在MCC发展至成熟阶段, 强降水区的云顶亮温值低于 -60°C , 云顶高度在12 km左右; 西南涡与高原涡相互作用时, 云顶亮温低值区的中心位置和强度与同时刻强降水特征很好对应; 降水云体中对流性降水粒子的反射率因子在低层快速增长, 层云性降水粒子的反射率因子强度增长的区域为零度亮带层附近; 对流性降水雨强远大于层云, 其粒子半径也大于层云降水, 而对流性降水粒子的浓度高于或等于后者; 层云对总降水量的贡献大于对流云, 且层云降水量表现出大小均匀的粒子积聚的结果; 对流性降水率垂直分布柱状明显且有云墙, 层云性降水率垂直分布呈不规则柱状且没有显著的云墙, 降水率均随海拔高度的升高而减小, 5 km以下对流层对总降水量的贡献最大。

关键词: 西南涡与高原涡, 多源卫星观测, 降水云空间结构, 降水粒子

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2021.04.014

Analysis of the Process of Heavy Rain and Cloud System Characteristics Caused by the Interaction of the Plateau Vortex and the Southwest Vortex

Pu Xuemin¹, Bai Aijuan^{1,2}, Mao Xiaoliang^{1,2,3}

(1 School of Atmospheric Sciences, Chengdu University of Information Technology, Chengdu, 610225

2 Sanya Meteorological Bureau, Sanya 572000

3 Chengdu Institute of Plateau Meteorology, China Meteorological Administration, Chengdu 610072)

Abstract: This paper uses multi-source observation data such as the new generation FY-4A satellite and GPM satellite precipitation radar to select two heavy rain cases where the plateau vortex interacts with the southwest vortex, and analyzes the mesoscale precipitation cloud system in the basin under the action of the two vortices. Spatial structure characteristics. The results show that the coupling of the southwest vortex and the plateau vortex produces a mesoscale convective complex MCC cloud system. Short-term heavy rainfall mainly occurs during the mature stage of MCC, and the cloud top brightness value of the large area covered by the heavy rainfall area is lower than -60°C . The height of the cloud top is about 12 km; when the southwest vortex interacts with the plateau vortex, the center position and intensity of the low brightness temperature area of the cloud top correspond well to the characteristics of the simultaneous strong precipitation; the reflectivity factor of the convective precipitation particles in the precipitation cloud is The low-level rapid growth, the area where the intensity of the reflectance factor of stratiform precipitation particles increases is near the zero-degree bright zone; the rain intensity of convective precipitation is much greater than that of stratiform clouds, and its particle radius is also greater than that of stratus precipitation, while the concentration of convective precipitation particles Higher than or equal to the latter; Stratus clouds contribute more to total precipitation than convective clouds, and stratus precipitation shows the result of particle accumulation of uniform size; Convective precipitation

rate is vertically distributed in a columnar shape with cloud walls, stratiform The vertical distribution of precipitation rate is irregular columnar and there is no significant cloud wall. The precipitation rate decreases with the increase in altitude. The troposphere below 5 km contributes the most to the total precipitation.

Keywords: southwest vortex and plateau vortex, multi-source satellite observation, precipitation cloud spatial structure, precipitation particles

收稿日期: 2020年8月30日; 修回日期: 2021年4月23日

第一作者: 蒲学敏(1995—), Email: pxm88dd@163.com

通信作者: 白爱娟(1971—), Email: baij@cuit.edu.cn

资助信息: 青海省科技厅应用基础研究项目(2020-ZJ-739);

泸州市科技计划项目(2019-YD-81); 高原与盆地暴雨旱涝灾害四川省重点实验开放研究基金(SZKT2017001)

0 引言

在热力和动力作用下青藏高原产生的高原涡、西南涡、高原切变线及高原低槽等低值系统常常带来灾害性天气，而高原涡与西南涡的相互作用通常造成强降水天气^[1-2]。降水云系的动热力结构和云团中水汽与冰水粒子间变化的微物理特征等都可以由降水云的空间结构特征反映^[2-3]。多普勒雷达通常能够确定降水云结构，包括水平和垂直方向，提供降水云体系统的三维空间结构信息。GPM (Global Precipitation Measurement) 双频测雨雷达DPR (Dual-frequency Precipitation Radar) 自2014年起已运行近6年，且许多气象学者利用个例分析对比验证了GPM卫星数据集的2级和3级产品数据的适用性比TRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission) 卫星强，并且由于GPM比前身具有更高灵敏度以及更广覆盖范围，弥补了部分地区观测资料缺乏的缺点，为降水垂直结构展现的云微物理过程提供了有利条件^[4-6]。金晓龙等^[7]通过对比包括GPM在内的3种降水数据在山区的适用性发现GPM卫星数据的精度最高，与观测数据的相关性最好。卢美圻等^[8]通过对比GPM双频测雨雷达DPR与地基S波段雷达探测台风结构得出，GPM测雨雷达资料可靠性高。全面认识降水的垂直分布及物理特征具有十分重要的意义，能够更好地理解降水云和动力热力

机制间的关联，以上研究进行的对比验证工作均反映GPM双频测雨雷达DPR数据可靠性高，基于GPM测雨雷达DPR的可靠性^[9-10]，而针对雷达降水的反演以及降水过程垂直结构的认识还有所欠缺。

已有研究表明新一代卫星可以为地形复杂，且没有地基雷达的地区提供降水云空间结构的探测，这为四川盆地不同类型降水云系垂直结构的研究提供了基础。西南涡和高原涡相互作用是高原以东强地形梯度区及四川盆地产生强降水的主要影响系统，目前有关该类天气系统降水云系空间结构的研究较少。因此，本文以2014年7月10日和2020年8月11日两次四川盆地的强降水过程为例，利用GPM 2A.DPR_MS数据产品和FY-4A AGRI产品数据并结合Interim再分析资料，对比分析降水云系的水平结构、垂直结构、降水廓线以及降水粒子微观信息，有助于加深对四川盆地地区强降水形成机制和降水云微物理特性的认识，促进数值天气预报模式质量的提高。

1 资料

所用资料为2014年7月和2020年8月的常规观测资料、ERA-Interim再分析资料、FY-4A的多通道扫描成像辐射计 (AGRI) 产品数据、FY-2G的亮温数据和GPM level 2双频反演产品2A_DPR_MS的轨道级数据 (表1)。

表1 数据汇总
Table 1 Data summary

资料	要素	时空分辨率	下载地址
ERA-Interim再分析资料	位势高度 H 、 U 、 V 、湿度 q	0.25°×0.25°、37层、6 h	https://apps.ecmwf.int/datasets/data/interim-full-daily/levtype=sfc/
GPM IMERG降水产品	降水率	0.1°×0.1°、0.5 h	
GPM DPR L2A产品	降水强度及反射率因子、雨滴谱、二维零度层高度以及降水类型分布	5 km, 1.5 h	https://gpm.nasa.gov/data-access/downloads/gpm
GPM GMI L1C产品	降水反射率、云顶亮温	89 GHz, 1.5 h, 13 km	
FY-4A卫星	云相态、云类型、云顶高度和云顶温度	4 km, 10 min	http://satellite.nsmc.org.cn/PortalSite/Data/Satellite.aspx

2A_DPR_MS数据提供的降水信息有三维衰减订正后的降水强度及反射率因子、雨滴谱、二维零度层高度以及降水类型分布。雨滴谱可提供粒子浓度和粒子半径两个参数，粒子浓度代表单位体积空气中雨滴数，粒子半径代表雨滴半径，其反演过程在DPR降水反演算法中可见描述^[11]。以亮带信息为基础，2A_DPR_NS使用DFRm方案提供降水类型划分^[12]，划分类型与PR产品保持一致，分为“对流性降水、层云性降水、其他降水”3种类型。分类依据为，检测到亮带的降水扫描点认为是层云性，但亮带附近的雷达回波大于39 dBz (对流性阈值)，认为是对流性降水，未出现亮带的降水扫描点的雷达回波廓线在回波顶以

下高度出现大于39 dBz，分类为对流性降水，此外其他情况为其他降水。

本文研究区域为四川盆地 (98°—109°E, 25°—36°N)，范围和地形图见图1。

2 天气过程

高原涡东移出高原地区到西南涡上方或西南涡西移动到高原涡下方，造成两涡在对流层上下位置相近的，称为高原涡与西南涡耦合。本文选用的是2014年7月8—10日 (简称“14·7”过程) 和2020年8月11—13日 (简称“20·8”过程) 四川盆地在高原涡与西南涡相互作用下发生暴雨天气过程的个例，在“14·7”过程中8日不同高度上位于同一低槽前的两涡相互作用

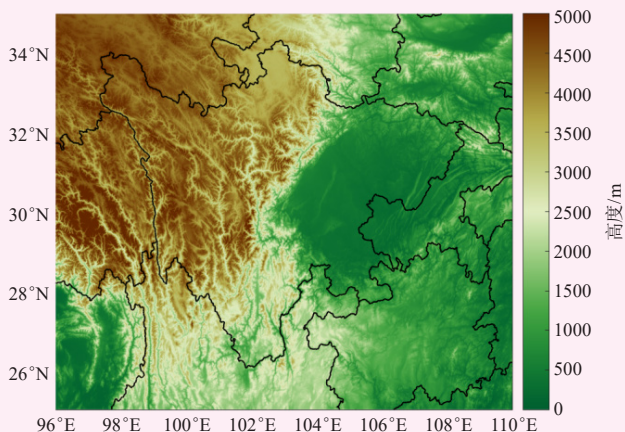


图 1 四川盆地及周边的地形高度图
(黑色为行政区划, 阴影为海拔高度)

Fig. 1 The topographical height map of the Sichuan Basin and its surroundings (the black is the administrative division, the shadow is the altitude)

导致西南涡强烈发展, 9日移出高原的高原涡与西南涡垂直耦合作用, 降水从盆地西部逐渐东移, 9日18时到10日22时为最强降水时段。“20·8”过程中11日两涡垂直耦合发生在高原涡南部和西南急流西侧, 受纬向气流影响, 四川大部分地区出现明显降水。

GPM核心观测平台于2014年7月10日20:00扫描到“14·7”过程中高原涡与西南涡垂直耦合后的天气过程, 2020年8月11日17:46扫描到“20·8”过程中两涡耦合作用时的天气过程。为进一步分析雷达扫描到的低涡降水过程, 利用ERA-Interim再分析资料绘制了700 hPa位势高度场和水汽通量图, 叠加GPM DPR探测的3.5 km高度的降水率水平分布(图2)。“14·7”过程中高原涡与西南涡相互作用产生降水中的降水云均位于低涡中心, 强降水区域均位于低槽前, 受强盛的偏南气流影响, 且此次暴雨集中出现在东北—西南走向的水汽辐合带中, 暴雨区水汽和能量充足。“20·8”过程中, 两涡垂直耦合时, 盆地由偏南气流控制, 将暖湿水汽持续输送至盆地, 为暴雨提供水汽条件。

3 降水云系的卫星云图特征

“14·7”过程中, 从红外云图演变可见(图3), 8日12:00盆地上空没有明显的降水云系, 直至14:00对流云团开始发展, 17:00高原东侧地形对低层涡旋动力强迫抬升产生上升运动, 云团迅速发展东移, 云核面积增大且云顶亮温降低, 中尺度对流复合体(MCC)发展。20:00高原涡槽前天气尺度强迫和地形共同作用下, 西南涡强烈发展, 盆地MCC呈现椭圆状。23:00 MCC范围扩大, 云顶温度 $< -72^{\circ}\text{C}$, 伴

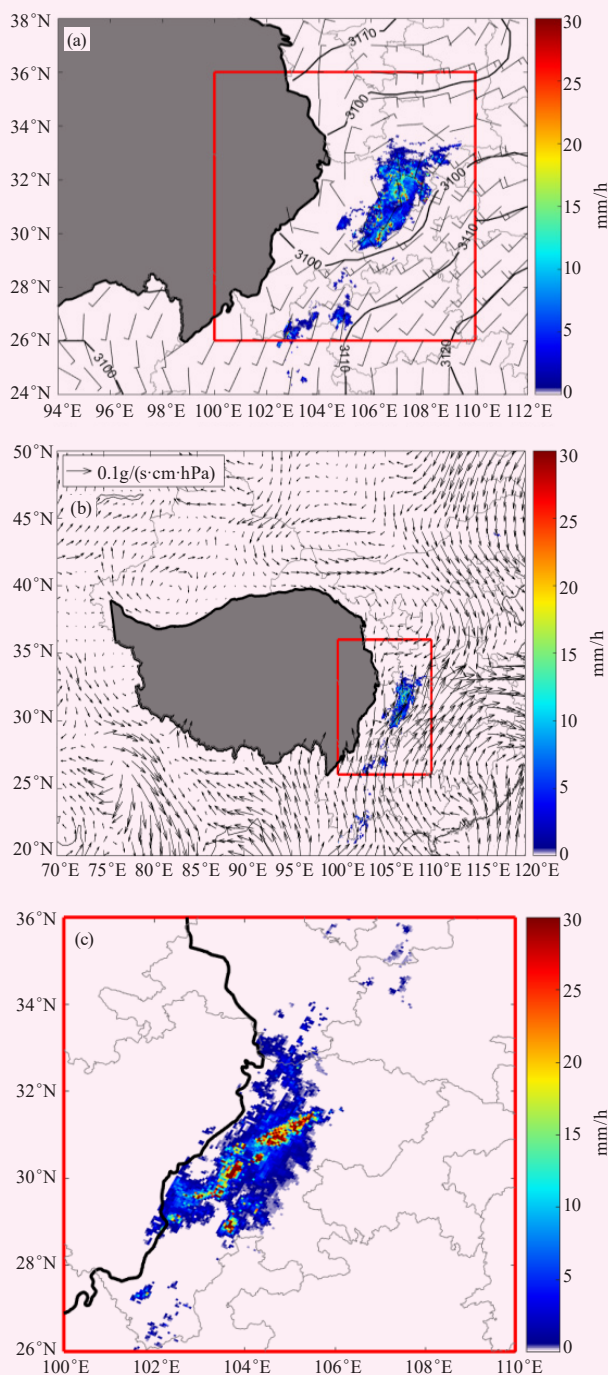


图2 2014年7月10日20:00(北京时,下同)GPM DPR探测的3.5 km降水率与EC对应时次700 hPa风矢量与位势高度(等值线)的叠加图(a)以及水汽通量散度分布(b)(阴影, 单位: $10^{-2} \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{hPa})$, 方框为盆地的位置), 以及2020年8月11日17:46(c)降水率

Fig. 2 Overlay of the 3.5 km precipitation rate detected by the DPR at 20:00 GPM on 10 July, 2014 and the 700 hPa wind vector and geopotential height (contours) corresponding to EC (a) and the distribution of water vapor flux divergence (b) (shadow, unit: $10^{-2} \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{hPa})$, the box is the location of the basin), and 17:46 BT on 11 August 2020 (c) precipitation rate

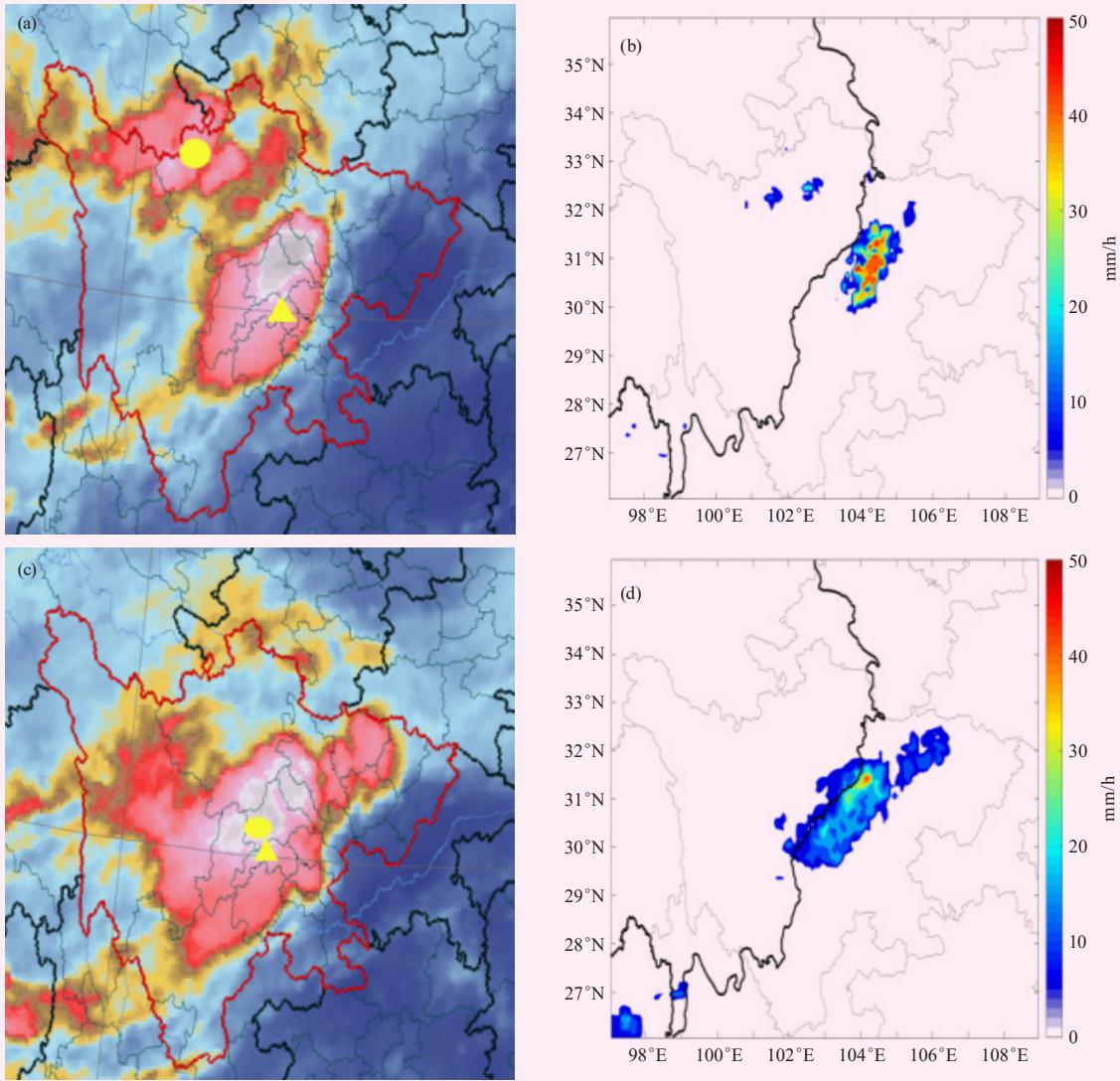


图3 2014年7月8日23: 00 (a, b)和9日23: 00 (c, d) 红外云图空间分布及其对应时刻GPM卫星的融合降水强度 (单位: mm/h) 分布

Fig. 3 The spatial distribution of infrared cloud images at 23:00 BT (a, b) on July 8, 2014 and 23:00 (c, d) on 9 July 2014 and their corresponding GPM satellite fusion precipitation intensity (unit: mm/h) distribution

随盆地暴雨。9日01: 00 MCC云团尺度减小, 结构松散, 仍满足MCC标准, 对应区域降水减小。

9日18: 00盆地多个云团发展, 21: 00高原涡与西南涡耦合, 云团合并, 冷中心区域增大, 盆地有暴雨。23: 00降水主要分布在TBB梯度大值区一侧。10日00: 00 MCC冷云面积明显减小, MCC特征消失。

“20·8”过程分析其降水云系特征。根据ECMWF模式的温度情况, 温度 $>0^{\circ}\text{C}$ 为水云, $<-20^{\circ}\text{C}$ 为冰云, 介于其间的为冰水混合云。 0°C 以上为暖云, 以下为冷云, 混合云处于 0°C 以下, 因此混合云属于冷云。冷云中既有过冷水, 又有冰晶粒子, 经过冰晶粒子的凝华和碰并聚集过程, 以及在 0°C 下融化后的碰并增长过程形成降水。不同云相态粒子对降水的形成

有一定的影响, 研究盆地地区不同云系, FY-4A卫星云产品提供包括晴空在内7种云相态。

图4为2020年8月11日17: 46的云相态、云类型、云顶高度和云顶温度水平分布的卫星观测实况, 表明“20·8”暴雨过程中强降水区域内云相呈冰云型, 云类型以冰云型为主。云顶高度是云系垂直结构的重要表征特征^[13-14]。卫星资料显示此次过程中两涡耦合时盆地存在一条呈东北—西南走向的云带, 且川渝地区的云系发展最深厚, 有大片云顶温度低值区, 云顶温度低于 -60°C , 降水云团云顶高度在12~19 km, 伴随盆地暴雨。随着暴雨发生发展时间的推移, 降水云系逐渐发展东移, 从盆地西部移至中部。

综上所述可见, “14·7”过程中两涡耦合作用

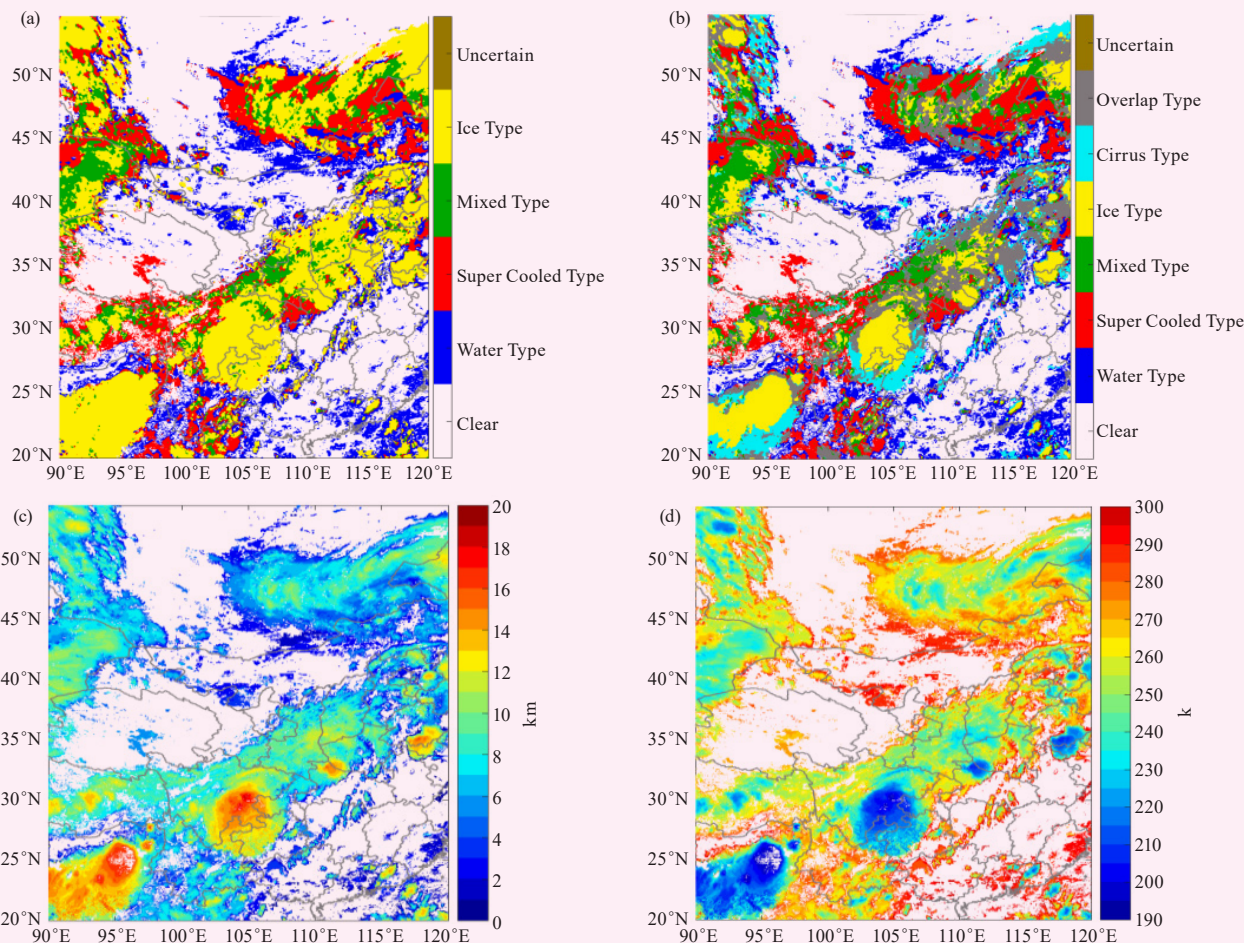


图4 FY-4A卫星观测的2020年8月11日17:46观测的降水云相态(a)、云类型(b)、云顶高度(c)和云顶温度(d)水平分布图
Fig. 4 The horizontal distribution of precipitation cloud phase (a), cloud type (b), cloud top height (c) and cloud top temperature (d) observed by FY-4A satellite at 17:46 BT on 11 August 2020

前,高原东部地形对低层涡旋的动力强迫抬升产生上升运动,是形成MCC的一种动力机制;两涡在盆地上空垂直耦合作用期间,高原涡槽前天气尺度强迫与地形共同作用,表现为多个云团合并发展;同一天气系统下两涡相互作用引发西南涡强烈发展伴随盆地上空旺盛的中尺度对流运动,以及东移出高原区域的高原涡与西南涡在盆地上空垂直耦合作用伴随MCC发展时,短时强降水区域与MCC相对应,降水落区集中在MCC云团TBB冷云团中心,强降水主要出现在MCC发展至成熟阶段。“20·8”过程中强降水区域内云相呈冰云型,云类型以冰云型为主,两涡耦合作用时云系发展最深厚,有大片云顶温度低值区,云顶温度低于 -60°C ,降水云团云顶高度在 $12\sim 19\text{ km}$,说明降水云体为强对流云团,伴随盆地暴雨。

4 降水结构分析

4.1 降水云系的水平结构特征

GPM 搭载的GMI S1通道提供的最高分辨率是

89 GHz亮温图像,由于盆地地形复杂特殊性,3.5 km高度以下地表对DPR回波会造成干扰^[15]。图5为两涡相互作用引发的两次暴雨天气过程中微波扫描辐射计GMI探测到降水云系的89 GHz微波辐射亮温分布图。

“14·7”过程中,由图5a可以看出微波亮温水平分布呈片状,亮温值低于 -60°C ,且与降水云系相对应,呈东北—西南走向,说明存在分布集中的冰水粒子在降水云系中,导致降水区对流发展旺盛。此次过程中的亮温和降水率水平分布在量值和走向上有很好的对应关系,强降水的发生对应亮温低值区,降水云系中的冰水粒子含量越多,其发出的散射信号越强,则亮温值越低。这与蒋璐君^[2]分析高原涡与西南涡引发强降水的天气过程对比得出的亮温与降水分布之间关系的结论一致。且此次降水过程的降水范围大且集中,最大降水率超过 20 mm/h ,降水雨带的南北范围大约为 330 km 。“20·8”过程中,由图5b可以看出此次强降水时段里微波亮温呈不均匀絮状,微波亮温值

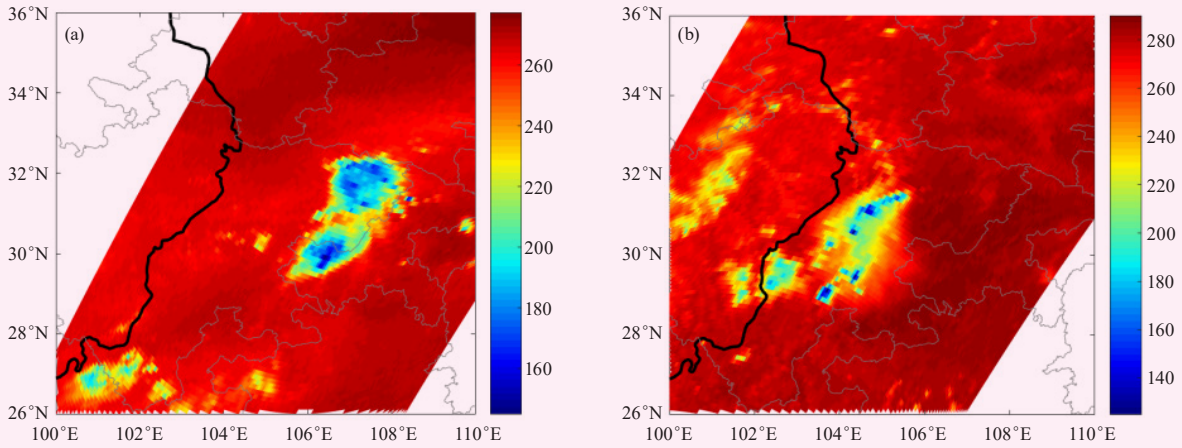


图5 2014年7月10日20: 00 (a) 和 2020年8月11日17: 46 (b) GPM GMI探测的89 GHz微波辐射亮温 (单位: K)
Fig. 5 The brightness temperature of 89 GHz microwave radiation detected by GPM GMI at 20:00 BT on 10 July 2014 (a) and at 17:46 BT on 11 August 2020 (unit: K)

低于220 K, 低值区与降水云系对应。且此次降水过程的降水范围呈带状分布。对比两次过程, “14·7”和“20·8”过程中的亮温值均较低, 降水云系集中, 降水强度大, 说明两涡垂直耦合作用并伴随中尺度对流体发生发展有利于短时强降水的产生。

降水粒子特征是对流强弱的一个主要标志, 利用GPM/DPR探测的降水廓线资料, 分析“14·7”和“20·8”暴雨过程中降水云体的对流云和层云降水的样本数量、总降水比例以及其平均降水率, 来揭示此

次低涡天气过程的降水粒子性质及其状态。“14·7”和“20·8”过程中层云降水样本数均多于对流降水, 两者的比例分别为2.8:1和4.7:1(表2, 图6)。“14·7”过程中从样本数量来看, 对流降水数量仅占总样本的26%, 但对流性降水样本的平均降水率比层云降水的平均降水率大, 达5.8 mm/h, 降水中是层云降水的5倍, 对总降水量的贡献达到63%, 接近37%层云降水贡献于总降水, 这与蒋璐君等^[2]研究指出对流降水贡献率要高于层云降水相同, 此两次过程的降水

表2 GPM DPR降水廓线数据的对流云和层云样本特征

Table 2 Convective cloud and stratigraphic cloud sample characteristics of GPM DPR precipitation profile data

降水类型	2014年7月10日				2020年8月11日			
	样本数量	像素比例	占总降水率的比例/%	平均降水率/(mm/h)	样本数量	像素比例	占总降水率的比例/%	平均降水率/(mm/h)
对流降水	871	0.26	63.5	5.8	1360	0.83	71.2	3.1
层云降水	2478	0.74	36.5	3.5	6464	0.17	28.8	1.6

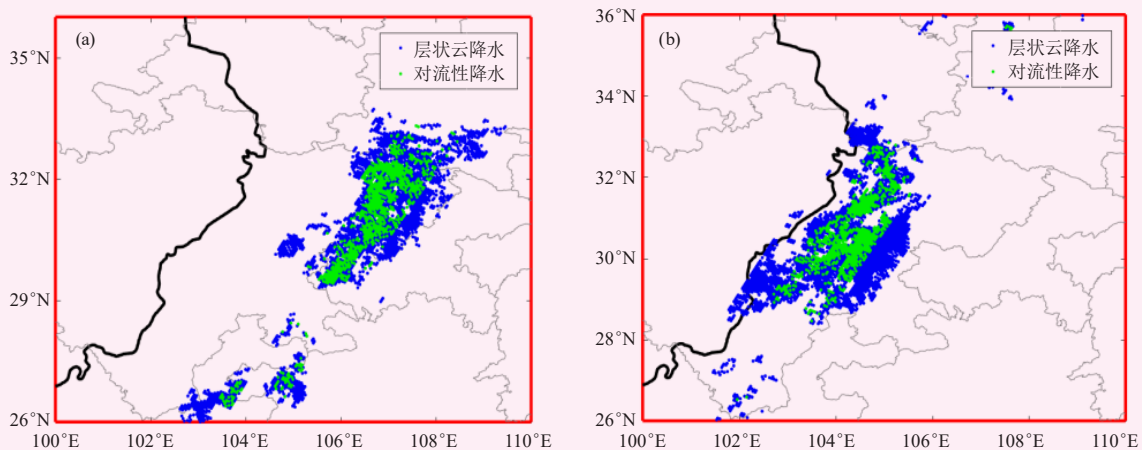


图6 GPM卫星DPR捕捉的2014年7月10日20: 00 (a) 和2020年8月11日17: 46 (b) 的层云和对流降水样本数分布
Fig. 6 The distribution of the number of stratus cloud and convective precipitation samples captured by GPM satellite DPR at 20:00 BT (a) on 10 July 2014 and 17:46 BT (b) on 11 August 2020

区域中，对流降水所占比例均大于层云降水比例，以降水强度大，降水范围大的对流降水为主，层云降水次之，其降水系统的强降水云团具有更旺盛的对流活动，从而产生更强的对流降水。

综上所述，“14·7”和“20·8”过程中低涡系统的降水云团对流活动旺盛，故此在高原涡与西南涡垂直耦合作用过程中，降水云团具有更旺盛的对流活动。

4.2 降水云系的垂直结构特征

云体的垂直结构是判断降水强度的重要组成部分，因而下面对“14·7”和“20·8”过程中降水云体的垂直结构进行分析。

4.2.1 降水率垂直分布

图7选取了降水云系中DPR探测的降水率大值中心的垂直剖面，“14·7”过程中有一个强降水中心，对流性降水的强度大，且对总降水量的贡献大，两涡作用下的降水系统引发不同类型降水的云顶高度都可达12 km左右，整体降水云顶高度较均匀，云顶平坦，表明此次过程对流活动较为旺盛。降水云的降水率大值中心均位于1~5 km层次内，被降水强度较小的云体包围，呈强烈垂直伸展的柱状结构，且降水率随高度升高而递减，表明垂直方向上降水分布不均匀。“20·8”过程中也有一个强降水中心，且对流降

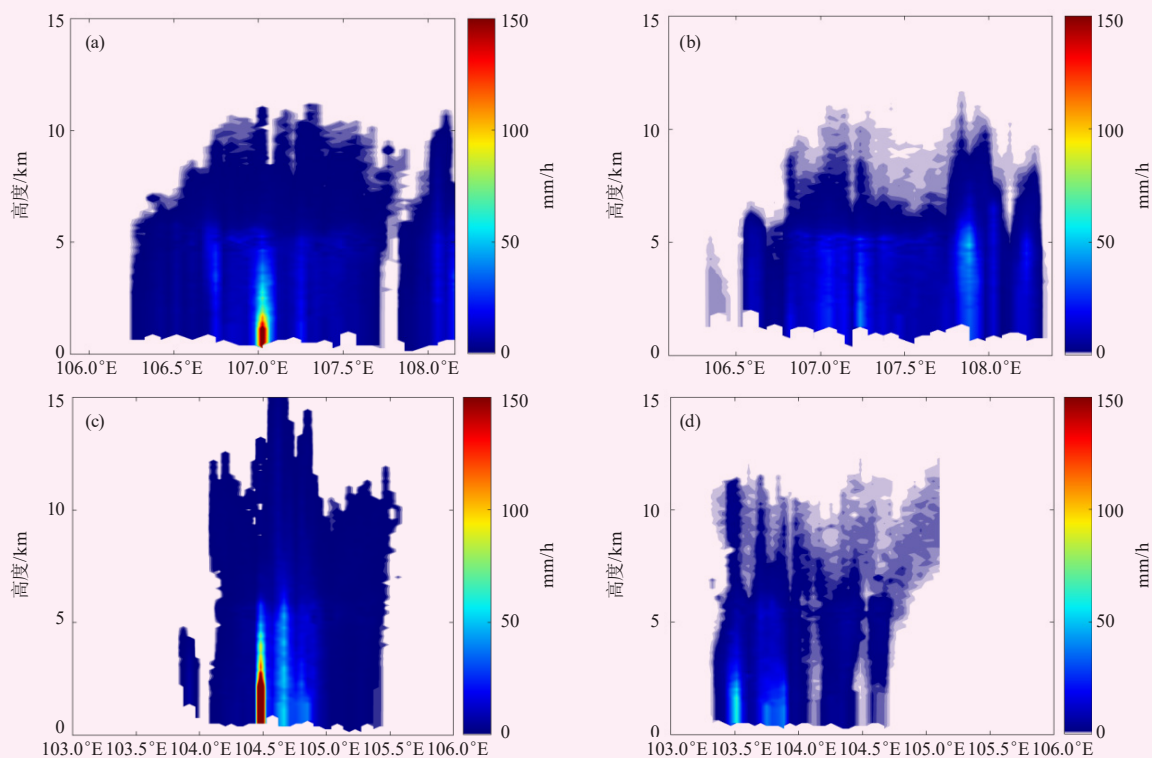


图7 2014年7月10日20: 00 (a, b)和2020年8月11日17: 46 (c, d)盆地地区对流性降水样本和层云降水样本的降水率垂直分布
Fig. 7 Vertical distribution of precipitation rates of convective precipitation samples and stratigraphic precipitation samples in the basin at 20:00 on 10 July 2014 (a, b) and 17:46 on 11 August 2020 (c, d)

水云顶高度可达15 km，降水云团中的上升运动强。综上，两涡耦合作用后以对流降水为主要降水系统，其典型特征为降水强度大，范围广。

4.2.2 降水率垂直廓线

降水廓线有助于了解云团的动热力和微物理的垂直结构特征，而平均廓线能够代表云体中80%以上样本的典型降水廓线特征^[16-17]。

从图8中可以看出，两次过程中不同类型降水样本的垂直廓线在5 km以下随高度降低而增加，最大降水率均出现在5 km高度以下，中高层其降水率降低，表明激烈的雨滴碰并增长过程以及降水潜热释放

大多集中在此高度下，水汽输送较强，云水含量较为集中。“14·7”过程中5 km以上降水率变化大，潜热释放更多，云顶高度最高达12 km，雨强显著减弱，但仍有少量降水存在。“20·8”过程中云顶高度可达15 km，5~15 km高度内降水廓线倾斜度大，表明云团内上升运动强烈，将降水粒子抬升至中高层。此次降水过程大片层云下的层云与对流降水混合模式下的强降水云团具有旺盛的对流活动。

4.2.3 降水云体的反射率因子

“14·7”过程中，从图9a、9b中可以看出对流性降水的反射率因子强度主要分布于20~45 dBZ，强

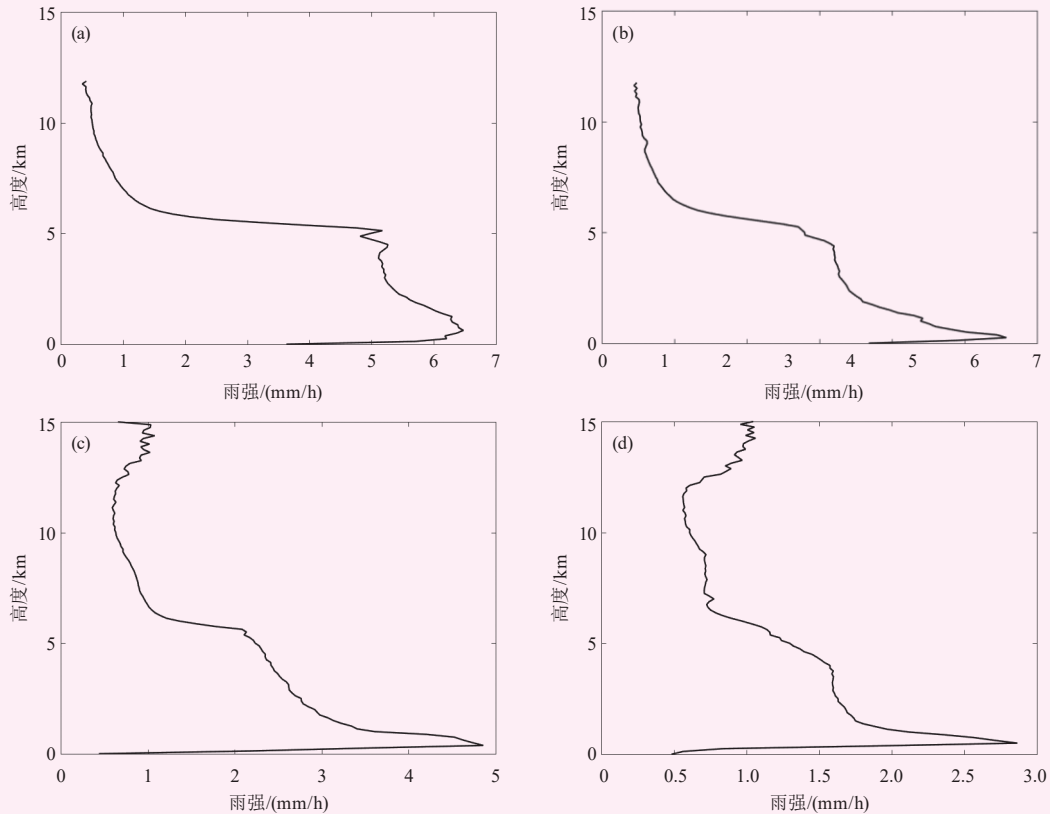


图8 2014年7月10日20: 00 (a, b) 和2020年8月11日17: 46 (c, d) 盆地对流云和层云降水率的平均廓线分布

Fig. 8 The average profile distribution of the precipitation rate of convective clouds and stratiform clouds in the basin at 20:00 BT on 10 July 2014 (a, b) and 17:46 BT on 11 August 2020 (c, d)

反射率因子高度集中在0~5 km, 对应了较低的降水云位置, 层云性降水与对流性降水的垂直分布类似。5~12 km层内随高度降低不同类型降水反射率因子强度增加, 说明此高度内云滴有所增长。3~5 km的高度范围内, 层云降水均呈现了明显的亮带特征。5 km以下的两类降水云反射率因子强度仍有增强的趋势, 最强可达45 dBz。这与盆地地区湿度高, 对流抬升旺盛有关。通过对盆地降水大值区(30.5°—31°N, 105.9°—106.5°E)的反射率因子进行统计发现(图9c、9d、9e), GPM双频测雨雷达最大能达到60 dBz, 最小为20 dBz。同时刻南充站多普勒雷达最大能达到56 dBz, 最小能达到10 dBz。

“20·8”过程中对流降水反射率因子强度主要分布于25~50 dBz, 强反射率因子高度集中在0~7 km, 对应了较高的降水云位置。强分布中心说明对流性降水粒子生长于低层, 而后在旺盛的对流作用中碰并增长向上移动, 而层云性降水与之类似, 说明了此两次过程中在大片对流性降水下对流云与层云混合降水, 引发强降水。

雷达反射率区域平均垂直廓线可表示降水云系垂直结构中的降水率差异^[18]。将廓线根据不同降水强

度分类。“14·7”过程对流性降水云系中(图10), 其反射率因子从高层到地面呈增长态势, 且地面雨强越大其反射率因子强度增长的越快。5 km以上不同地面降水强度其降水廓线分布类似, 由于地面空气含水量或者温度等使得5 km以下的降水廓线有波动。地面雨强<1.5 mm时, 属于弱降水, 此时部分降水粒子中途受蒸发和上升气流的影响较大。地面雨强逐渐变大时, 4 km以下的反射率因子强度明显增加, 此时与中低层对流活动有关。不同于对流性降水, 层云性降水反射率降水廓线在5 km左右呈现明显亮带, 层云性降水在此层上有较好的降水粒子转化率, 从亮带所在层次到地面, 层云性降水中随高度降低其反射率因子强度增强, 且其增长幅度随着地面雨强大小的增长而增长, 其涨幅也随之增强后增大, 最大达40 dBz。亮带附近1 km高度内降水反射率随高度变低明显增加。“20·8”过程中对流性降水反射率随高度增加呈减弱趋势, 同时地面降水越大则粒子浓度增加越快。层云性降水反射率廓线在6 km左右呈亮带特征, 在亮带附近高度内降水反射率变化大, 当地面降水大于50 mm/h时差值可达到14 dBz。

综上, 对流性降水中其反射率因子强度增长一

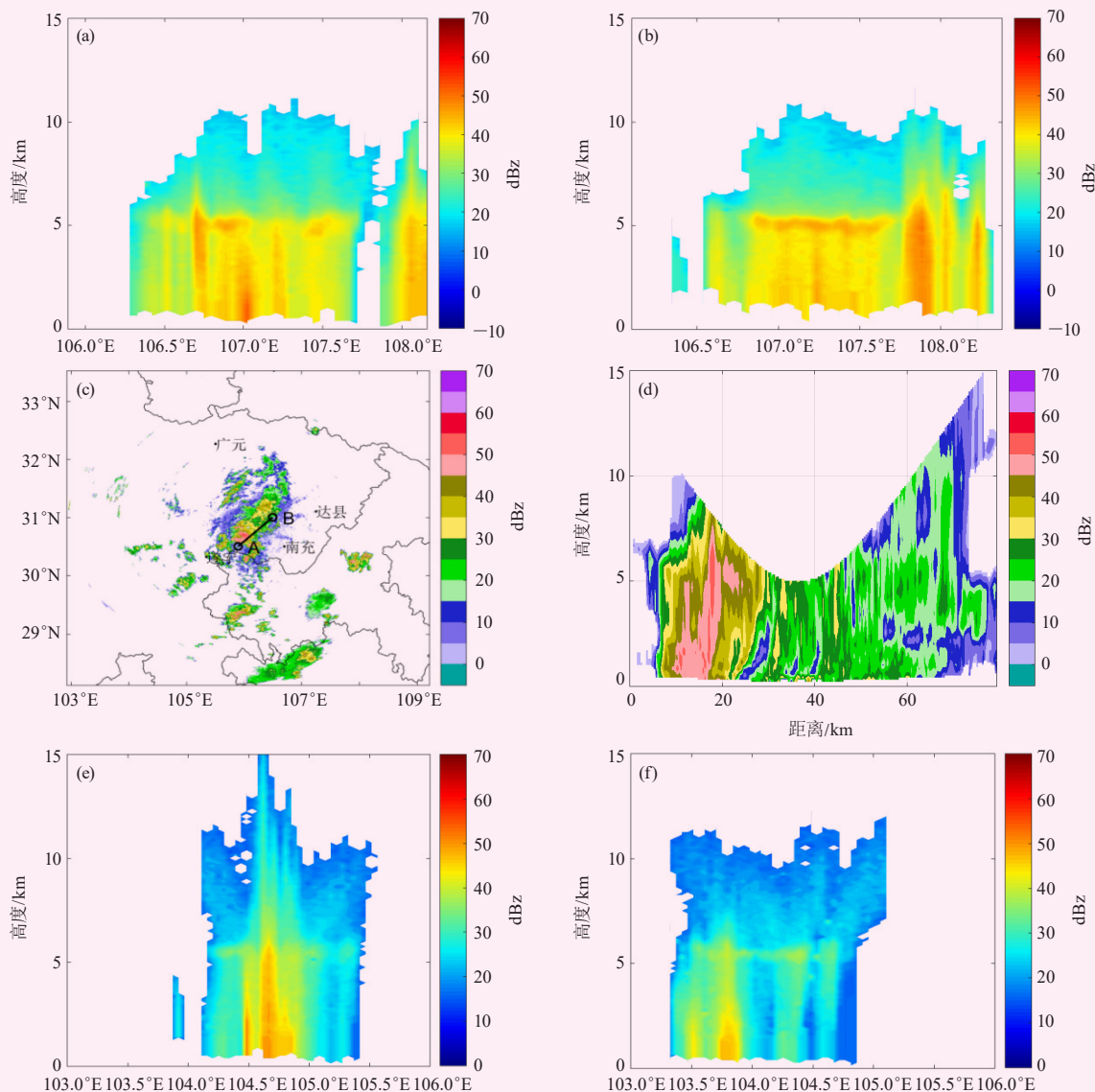


图9 2014年7月10日20:00雷达反射率垂直分布 (a, e: 对流性降水; b, f: 层云性降水) 与南充站多普勒雷达 (c, d) 和2020年8月11日17:46雷达反射率垂直分布 (e, f)

Fig. 9 The vertical distribution of radar reflectivity at 20:00 BT on 10 July 2014 (a, e: convective precipitation, b, f: stratiform precipitation) and the Doppler radar at Nanchong Station (c, d) and Vertical distribution of radar reflectivity at 17:46 BT on 11 August 2020 (e, f)

般发生在低层，且受蒸发和对流运动影响更大，而层云性降水中其反射率因子强度增长的区域则为亮带附近，降水粒子落下的过程中穿过融化层其反射率因子强度有所增大。无论是反射率因子强度随高度的变化特征还是降水廓线的垂直特征，反射率因子强度均在5 km以下的区域发生增长。Das等^[19]表示融化层及以下部分的降水廓线随高度变化的特征在进一步优化降水估测中十分关键。

4.2.4 降水粒子浓度与半径的垂直分布

在分析两类降水反射率因子的垂直分布后，进一步探寻两类降水微观粒子的垂直分布特征。粒子浓度

和粒子半径是影响降水强弱的关键粒子谱参数^[20]。图11给出两粒子分布结果，“14·7”过程中粒子浓度参数范围在20~50，雨滴粒子半径范围在0.5~2.5 mm。层云性降水相较于对流性降水其分布值域较宽，粒子谱发展的高度与对流性降水可发展的高度相似。由对流性降水的粒子浓度及半径分布图可看出，粒子浓度集中在33~34，相应的高度在6 km之下，随着高度的降低粒子的浓度有所增大。在6 km以下的层结内雨滴半径大多集中在1~1.2 mm，也有部分雨滴半径达到2.2 mm。而层云性降水的降水粒子浓度随着高度的降低而增长的趋势没有前者显著，在8 km至地面的整

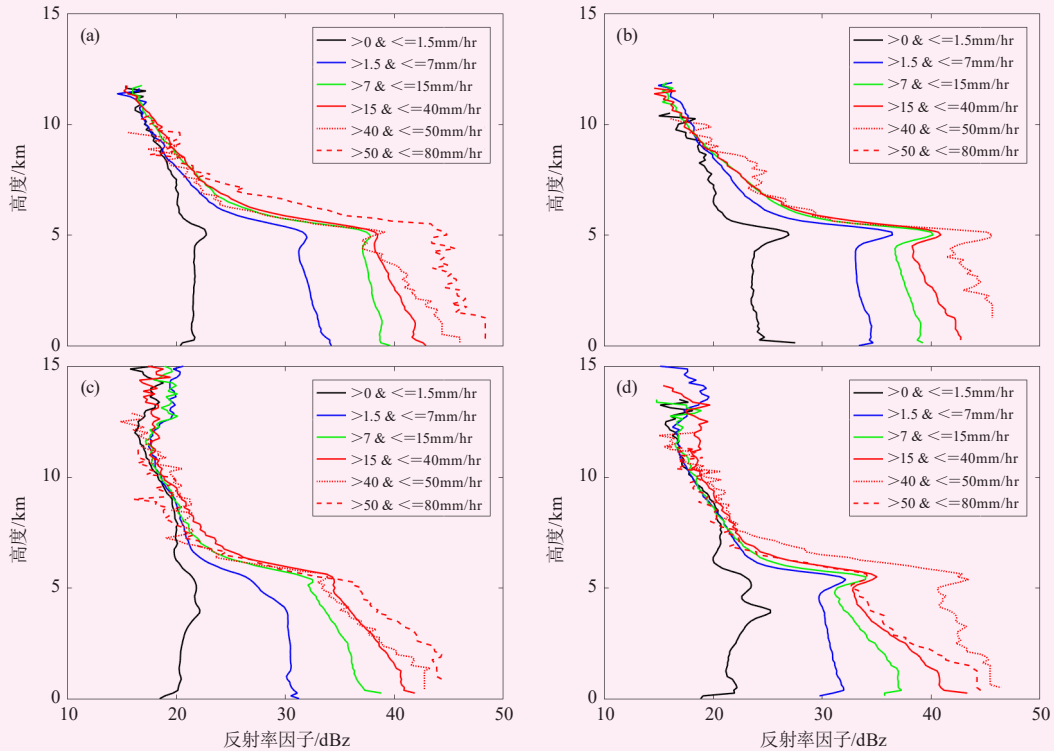


图10 2014年7月10日20: 00 (a, b) 和2020年8月11日17: 46 (c, d) 盆地地区对应不同地面降水强度的降水雷达反射率廓线 (a, c为对流降水; b, d为层云降水)

Fig. 10 Radar reflectivity profiles of precipitation corresponding to different ground precipitation intensities in basin areas at 20:00 BT on 10 July 2014 (a, b) and 17:46 BT on 11 August 2020 (c, d) (a, c) convective precipitation, (b, d) stratus precipitation

个中低层内粒子浓度基本稳定在35左右。8 km以下的层云性降水粒子半径多集中在1 mm，近地面的蒸发作用使层云性降水中的小粒子半径减小或者消失。

“20·8”过程中降水粒子浓度参数范围在25~45，雨滴粒子半径范围在0.5~2.0 mm。对流降水粒子浓度集中在30~35，相应高度在7 km以下。层云性降水粒子半径由7 km到地面呈减小趋势。

综上，对流的粒子在6 km以下的低层内是处于浓度高尺度较大的活跃状态，这与雷达回波在底层内的变化趋势相符。区别于对流性降水，层云性降水的粒子浓度表现出较为均匀对称的分布特征，且随着高度降低降水粒子浓度的增长没有前者显著，粒子浓度基本稳定。近地面的蒸发作用使层云性降水中的小粒子半径减小或者消失，这也是近地面平均反射率因子强度低于中高层的重要原因。

4.2.5 降水粒子廓线

图12和图13给出了盆地地区降水粒子浓度和半径的降水粒子信息廓线图。由粒子浓度廓线（图12）可以看出，“14·7”和“20·8”过程中两种类型降水均表现为单增趋势，随着高度的降低其粒子浓度越大，

且还可看出对流降水粒子浓度并不总大于层云降水。根据粒子半径廓线（图13）得出，两次过程中对流性降水粒子与地面降水强度成正比，地面降水强度越强，粒子半径越大，在5~7 km以下的粒子半径增长更为显著。而层云性降水中不同的降水强度其粒子半径差异不大，小雨、中雨或者大雨在低层里粒子的半径均在1.5~1.7 mm的范围内。综上，对流性降水粒子与地面降水强度成正比，地面降水强度越强，粒子半径越大。层云性降水所带来的强降水往往是由大小类似的粒子聚集所引起的，并未形成尺度更大的粒子。

5 总结

利用多源卫星资料和再分析资料，选择2014年7月10日以及2020年8月11日两次发生在四川盆地的高原涡与西南涡相互作用下产生的暴雨天气过程，分析两涡作用下产生暴雨的天气特征和降水云特征，得到以下主要结论。

1) 高原涡与西南涡相互作用产生暴雨的降水云位于低涡中心，强降水区域均位于低槽前，受强盛的偏南气流影响，暴雨集中出现在东北—西南走向的水汽辐合带中，暴雨区水汽和能量充足。

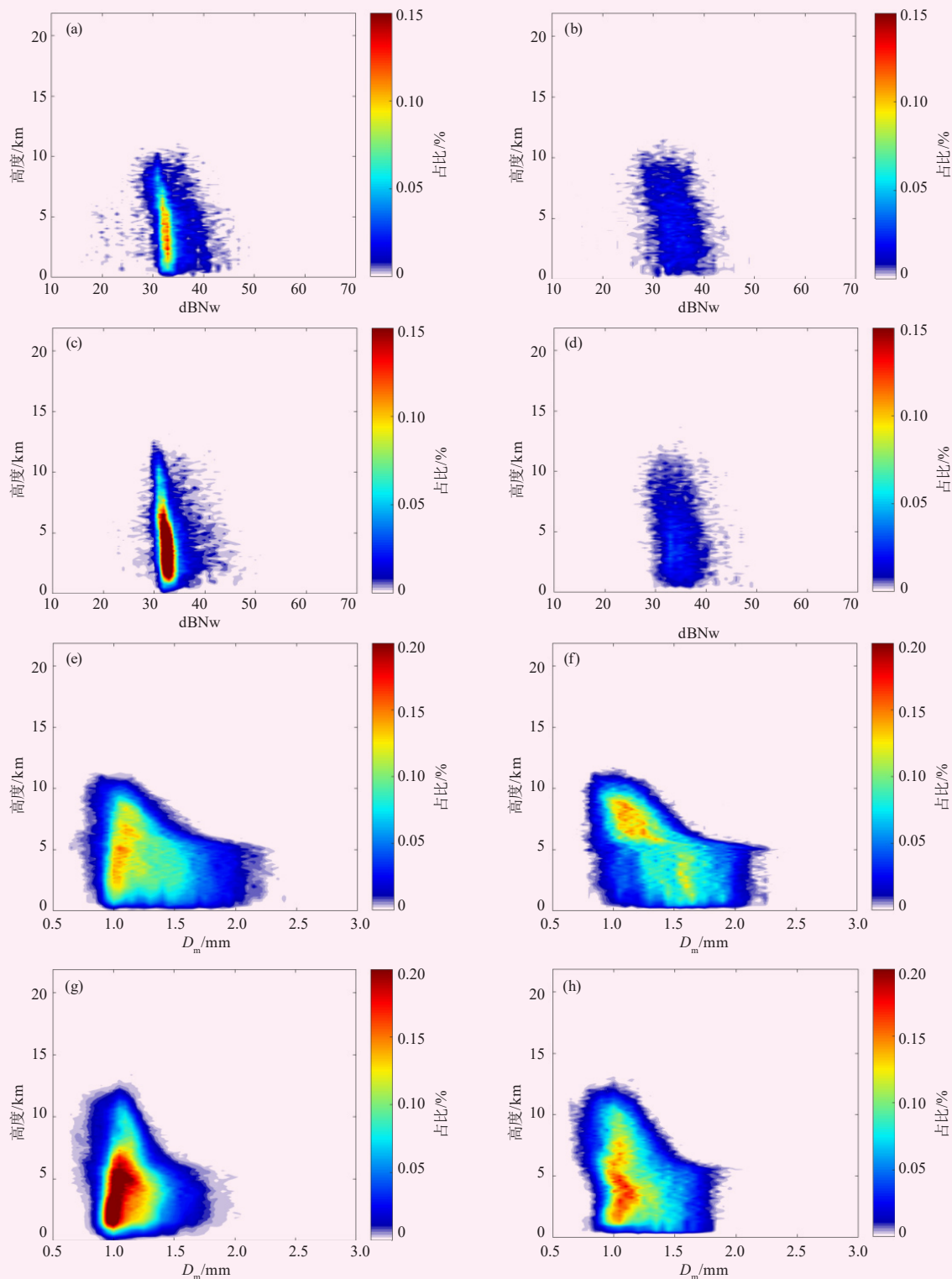


图11 2014年7月10日20:00 (a~d) 和2020年8月11日 (e~f) 17:46盆地地区降水粒子信息垂直分布 (a, c) 对流性降水粒子浓度参数; (b, d) 层状性降水粒子浓度参数; (e, g) 对流性降水粒子半径 (mm); (f, h) 层状性降水粒子半径 (mm) (填色为频率)

Fig. 11 Vertical distribution of precipitation particle information in basin area at 20:00 on 10 July 2014 (a-d) and at 17:46 on 11 August 2020 (e-f) (a, c) convective precipitation particle concentration parameters, (b, d) layer concentration parameters of morphological precipitation particles, (e, g) convective precipitation particle radius (mm), (f, h) stratified precipitation particle radius (mm), color is frequency))

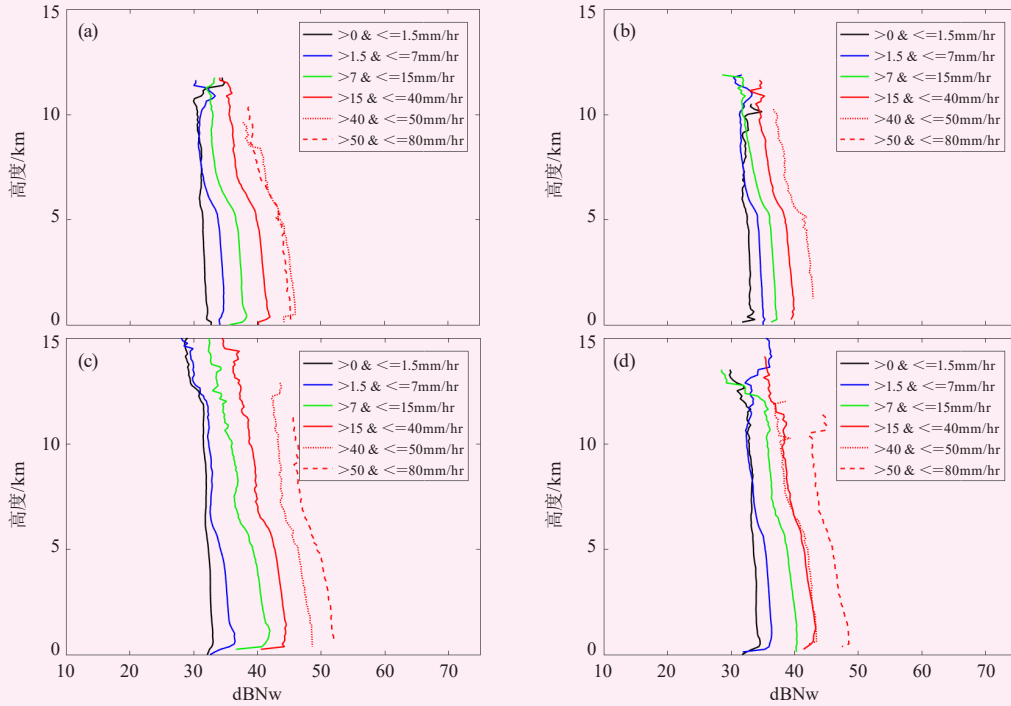


图12 2014年7月10日20: 00 (a, b) 和2020年8月11日17: 46 (c, d) 盆地地区对应不同的降水量级 (mm/h) 的降水粒子信息廓线 (a, c) 对流性降水粒子浓度参数; (b, d) 层状性降水粒子浓度参数

Fig. 12 The precipitation particle information corresponding to different precipitation levels (mm/h) in the basin area at 20:00 on 10 July 2014 (a, b) and 17:46 on 11 August 2020 (c, d)

(a, c) convective precipitation particle concentration parameters, (b, d) stratified precipitation particle concentration parameters

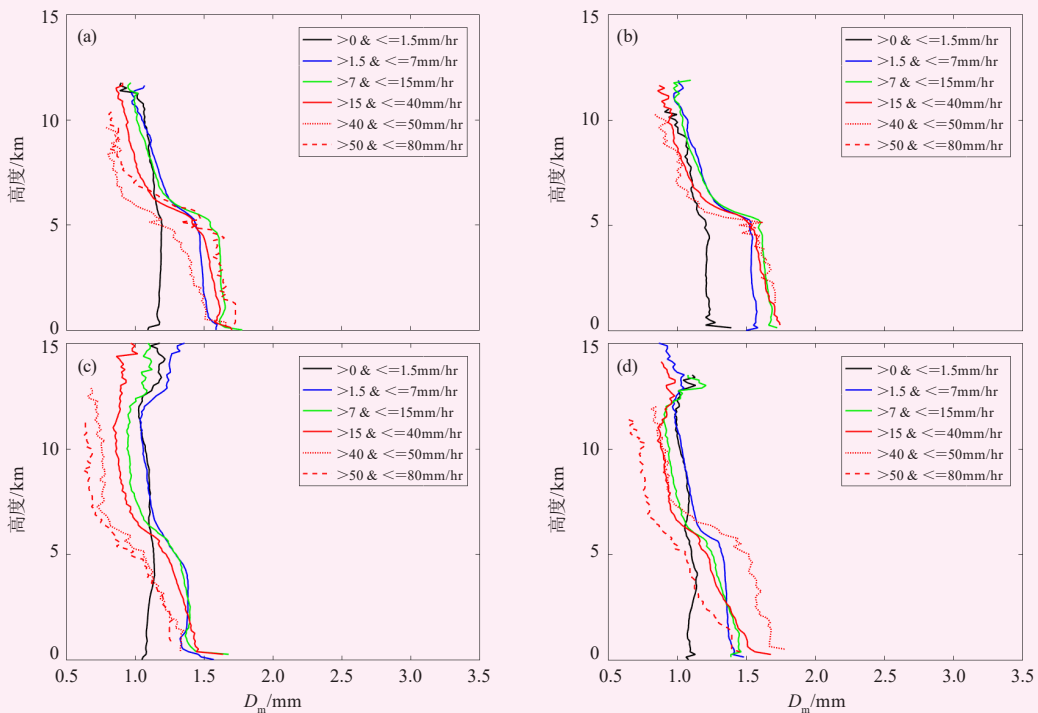


图13 2014年7月10日20: 00 (a, b) 和2020年8月11日17: 46 (c, d) 盆地地区对应不同的降水量级 (mm/h) 的降水粒子信息廓线 (a, c) 对流性降水粒半径; (b, d) 层状性降水粒子半径

Fig. 13 The precipitation particle information corresponding to different precipitation levels (mm/h) in the basin area at 20:00 BT on 10 July, 2014 (a, b) and 17:46 BT on August 11, 2020 (c, d) Profile

(a, c) Convective precipitation particle radius; (b, d) Stratified precipitation particle radius

2) 短时强降水区域与MCC相吻合, 且集中出现在MCC发展至成熟阶段。“14·7”过程中两涡耦合作用前, 高原东部地形对低层涡旋的动力强迫抬升产生上升运动, 是形成MCC的一种动力机制; 两涡在盆地上空垂直耦合作用期间, 高原涡槽前天气尺度强迫与地形共同作用, 表现为多个云团合并发展, 降水区域主要集中在TBB梯度大值区一侧。“20·8”过程中两涡耦合时云系发展深厚, 降水云系表现为冰云型, 大片云顶温度低值区, 最低可达 -60°C , 云顶高度最高伸展达15 km, 表明对流降水旺盛。

3) 两次过程的降水云发展中, 层状云对总降水的贡献大于对流降水, 但对流性降水的平均降水率远大于层云降水, 并且云系的亮温低值区强度和水平分布与同时刻降水区分布很好对应。

4) 两涡作用中, 降水云系在垂直方向上发展不均匀, 强降水区降水粒子在垂直分布柱状, 且有显著的云墙发展, 层云性降水云垂直分布较平坦, 且未有云墙出现。无论是对流降水还是层云降水, 其降水率的大值区均位于5 km以下, 此高度层对流降水对总降水量的贡献也最大, 5 km以上降水粒子数减少, 其贡献均呈下降趋势。

5) 对流性降水反射率因子在低层快速增长, 基本处于浓度高尺度大的活跃状态, 层云性降水反射率因子在亮带层附近增长, 不同的降水强度其粒子半径差异不大; 对流降水雨强远大于层云, 其粒子半径大于层云性降水, 但粒子浓度不总高于后者; 层云对降水量的贡献大于对流云, 且往往来自于大小均匀的粒子积聚。

参考文献

- [1] 郁淑华, 高文良. 高原低涡与西南涡结伴而行的不同活动形式个例的环境场和位涡分析. 大气科学, 2017, (4): 832-853.
- [2] 蒋璐君, 李国平, 王兴涛. 基于TRMM资料的高原涡与西南涡引发强降水的对比研究. 大气科学, 2015, (2): 249-259.
- [3] 傅云飞, 宇如聪, 徐幼平, 等. 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, 2003, 61(4): 421-431.
- [4] Zhang A, Fu Y F. The structural characteristics of precipitation cases detected by dual-frequency radar of GPM satellite. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2018, 42(1): 33-51.
- [5] 吴一凡, 张增信, 金秋, 等. GPM卫星降水产品在长江流域应用的精度估算. 人民长江, 2019, (9): 77-85, 152.
- [6] Hou A Y, Kakar R K, Neeck S, et al. The global precipitation measurement mission. Bulletin of the American Meteorological Society, 2014, 95(5): 701-722.
- [7] 金晓龙, 邵华, 张弛, 等. GPM卫星降水数据在天山山区的适用性分析. 自然资源学报, 2016, 31(12): 2074-2085.
- [8] 卢美圻, 魏鸣. GPM资料在分析“彩虹”台风降水垂直结构中的应用. 遥感技术与应用, 2017, 32(5): 904-912.
- [9] Tang G, Zeng Z, Long D, et al. Statistical and hydrological comparisons between TRMM and GPM Level-3 products over a midlatitude basin: is Day-1 IMERG a good successor for TMPA 3B42V7?. Journal of Hydrometeorology, 2016, 17(1): 121-137.
- [10] 董国涛, 樊东, 杨胜天, 等. GPM与TRMM降雨数据在黄河流域适用性分析. 水土保持研究, 2018, 25(3): 81-87.
- [11] Iguchi T, Seto S, Meneghini R, et al. GPM/DPR level 2 algorithm theoretical basis document. NASA, 2010, [2017-02-24].
- [12] Le M, Chandrasekar V. Hydrometeor Profile Characterization Method for Dual-Frequency Precipitation Radar Onboard the GPM. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2013, 51(6 Part2): 3648-3658.
- [13] Houze Jr, Robert A. Cloud clusters and large-scale vertical motions in the tropics. Journal of the Meteorological Society of Japan Ser II, 1982, 60(1): 396-410.
- [14] Shenk W E. Cloud top height variability of strong convective cells. Journal of Applied Meteorology, 1974, 1(8): 917-922.
- [15] Kotsuki S. GPM/DPR Precipitation Compared with a 3.5-km-Resolution NICAM Simulation. Scientific Online Letters on the Atmosphere Sola, 2014, 10(1): 204-209.
- [16] Fu Y, Liu G. The variability of tropical precipitation profiles and its impact on microwave brightness temperatures as inferred from TRMM data. Journal of Applied Meteorology, 2001, 40(12): 2130-2143.
- [17] 尹金方, 王东海, 翟国庆, 等. 基于星载云雷达资料的东亚大陆云垂直结构特征分析. 气象学报, 2013, 71(1): 121-133.
- [18] 仲凌志, 陈林, 杨蓉芳, 等. 基于星载测雨雷达2004—2014年观测的川渝地区降水垂直结构的气候特征. 气象学报, 2018, 76(2): 213-227.
- [19] Das S, Maitra A. Vertical profile of rain: Ka band radar observations at tropical locations. Journal of Hydrology, 2016, 534: 31-41.
- [20] Ulbrich, Carlton W. Natural variations in the analytical form of the raindrop size distribution. Journal of Climate and Applied Meteorology, 1983, 22(10): 1764-1775.