

文章编号: 2096-1618(2024)06-0718-09

# 一次典型西南涡降水的垂直结构和微物理特征研究

江 叶, 刘艳霞, 文 军, 郑佳锋, 陈杨瑞雪

(成都信息工程大学大气科学学院, 四川 成都 610225)

**摘要:**为进一步认识西南涡降水的影响,利用2020年8月11日全球降水测量卫星(GPM)星载双频雷达(DPR)探测资料,结合欧洲中期天气预报中心ERA5再分析资料、地面自动站资料和FY-2G卫星资料,对一次典型西南涡降水的垂直结构和微物理特征进行研究。结果表明:此次过程由高原涡诱生出西南涡导致,盆地西部整体位于槽前正涡度区域,受偏南暖湿气流的控制。此次西南涡降水表现为混合性降水,即片状的层云降水中混入块状的对流降水。雷达测量的雨顶高度与降水的大值区相对应,反应出上升对流强烈。雷达的观测结果表明,两类降水的垂直结构和微物理过程有显著差异。对于层云降水,其垂直尺度较大,其回波强度、数浓度、粒径及降水强度整体随高度下降而增大,雨滴谱分布更集中,以浓度略低的中小雨滴为主。冻结层以上,凝华、碰并等效率较低且缓慢;冻结层以下,以碰并过程为主。而对流降水的垂直尺度更大,粒径大且浓度高,导致回波强度和降水强度较大,以浓度较高的中大雨滴为主。冻结层以上,有快速的冰晶增长及活跃的冰相过程;冻结层以下,以碰并和破碎为主,效率强于层云降水。

**关键词:**西南涡;GPM卫星;垂直结构;微物理特征

**中图分类号:**P412.27

**文献标志码:**A

**doi:**10.16836/j.cnki.jcuit.2024.06.011

## 0 引言

西南涡是青藏高原东侧背风坡特殊地形、热力与大气环流相互作用下,在中国西南地区形成的一种 $\alpha$ 中尺度闭合低涡系统。西南涡常出现在700~850 hPa等压面上,水平尺度平均约400 km,生命史一般低于48 h,是中国除台风外造成降水影响最大的天气系统<sup>[1-4]</sup>。西南涡主要源自川西高原南部的九龙地区、中部的小金地区和四川盆地<sup>[5]</sup>。西南涡在合适条件下还会东移发展,给长江中下游地区带来严重的暴雨等洪涝灾害<sup>[6-7]</sup>。西南涡及其降水的观测和研究一直是中国气象领域的重点和热点之一。

学者们对西南涡的生效演变机制、数值模拟及造成的天气影响等方面开展了大量研究<sup>[1,8-11]</sup>,也开展了西南涡观测的加密实验<sup>[12]</sup>;而对西南涡降水的观测,气象卫星和雷达是主要手段之一。基于风云2C和2E卫星云图的研究表明,西南涡在移出源地前的水汽暗带大多呈纬向分布,高空短波槽对西南涡的东移和增强有重要作用;云顶红外亮温急剧下降至接近甚至低于水汽亮温时,预示着强降雨的发生<sup>[13-17]</sup>。地基多普勒天气雷达的观测表明,西南涡造成暴雨时的回波中心强度大多都超过55 dBZ,强回波会出现列车

效应,从而导致极端强降水的发生<sup>[17-20]</sup>。

由于西南地区地形复杂、地基雷达观测受到较大限制,因此星载气象雷达,如热带降水测量卫星TRMM(tropical rainfall measuring mission)和全球降水测量卫星GPM(the global precipitation measurement)可作为研究西南涡降水的重要补充手段。周森等<sup>[21]</sup>和蒋璐君等<sup>[22]</sup>利用TRMM的测雨雷达PR(precipitation radar)资料研究了典型西南涡降水的结构和特征,指出西南涡以范围较大、强度较弱的层云降水为主,但对流性降水对总降水量的贡献更大,且雨滴的碰并增长过程和凝结潜热的释放过程主要集中在8 km以下;东移型和东北移型的西南涡云系影响范围更广,而东南移型的西南涡云系则更为密实、呈块状。GPM作为TRMM的继承者,搭载了更先进的双频测雨雷达DPR(dual frequency precipitation radar)。GPM/DPR相比TRMM/PR提高了对弱降水的观测能力,并探测到降水的相关微物理参数。目前已将GPM/DPR资料用于台风降水和梅雨降水等相关研究中<sup>[23-27]</sup>,但该雷达资料在西南涡中的应用研究还相对较少。因此,本文利用GPM/DPR观测的雷达参量及微物理量资料,结合FY-2G卫星资料和ERA5再分析资料等,对2020年8月11日发生在四川盆地的一次典型西南涡强降水过程进行研究,包括此次西南涡雨带的垂直结构和微物理特征等,旨在为进一步认识西南涡降水的物理过程和特征提供参考。

收稿日期:2023-07-04

基金项目:国家自然科学基金资助项目(42205008)

通信作者:刘艳霞. E-mail:liuyx@cuit.edu.cn

## 1 资料与方法

此次西南涡降水过程于2020年8月10–12日从西向东影响大部分四川盆地,盆地西部出现大面积暴雨和大暴雨,其中绵阳、德阳、成都、眉山等局地出现特大暴雨,造成严重的内涝等灾害。GPM/DPR于2020年8月11日18:16–18:19经过盆地上空,本文使用其过境时探测的雷达反射率因子(dBZ)、降水类型、雨滴谱广义截距参数( $\text{mm}^{-1} \cdot \text{mm}^{-3}$ )、雨滴质量加权平均直径(mm)、降水强度( $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$ )、雨顶高度 $H_{\text{ET}}$ (m)、冻结层高度 $T_0$ ( $^{\circ}\text{C}$ )等资料。其中 $Z_e$ 、 $N_w$ 、 $D_m$ 和 $R$ 为三维数据,水平和垂直探测范围分别为250 km和0~22 km,水平和垂直的空间分辨率分别为5 km和250 m, $H_{\text{ET}}$ 、降水类型和 $T_0$ 为二维数据,水平探测范围和分辨率同上。采用资料还包括欧洲中期天气预报中心的ERA5再分析资料、地面自动站雨量资料和FY-2G云顶亮温TBB资料。ERA5再分析资料用于分析过程的天气背景,并确定西南涡位置;FY-2G的TBB和地面雨量资料用于分析西南涡云系的演变和降水实况;GPM/DPR

资料重点用于分析西南涡雨带的结构和不同类型降水的微物理特征。在分析雷达参量的垂直结构时,将 $Z_e$ 、 $N_w$ 、 $D_m$ 和 $R$ 进行统计,得到参量标准化高度频次分布,计算公式为<sup>[28]</sup>

$$\text{NCFAD} = \frac{N_{ij}}{\text{Max}(N)} \quad (1)$$

式中, $N_{ij}$ 表示不同高度区间和参量区间的样本频数, $\text{Max}(N)$ 表示所有区间的最大频数。

## 2 天气背景和降水实况

张静等<sup>[29]</sup>对此次西南涡降水过程的分析表明,此次过程是由高原涡诱生出西南涡导致,这与赵玉春等<sup>[30]</sup>研究的西南涡个例生成方式类似。如图1为2020年8月11日700 hPa位势高度场和风场,可见在12时(UTC,下同),四川盆地中部出现风场辐合;至16时,西南涡已发展成熟,中心位势高度为301 dagpm左右;随着时间推移,西南涡的影响范围逐渐扩大,盆地西部整体位于槽前的正涡度区域,受偏南暖湿气流的控制。

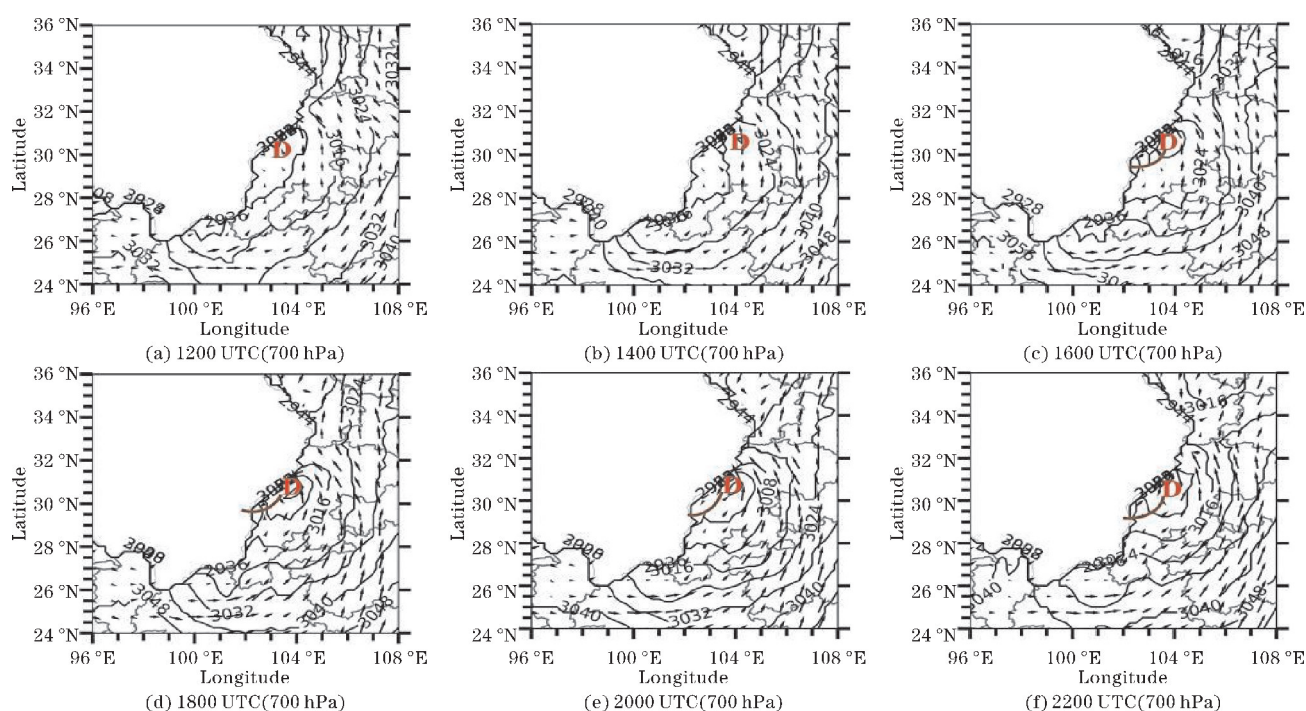


图1 2020年8月11日1200–2200 UTC 700 hPa位势高度场和风场(D和棕色粗实线为低压中心和槽线)

从图2中的FY-2G红外亮温TBB云图来看,由于高原低涡下滑东移,8月11日12时有对流云出现;14时,随着西南涡的生成,低涡东南侧的对流云逐渐合并,范围也逐渐扩大;16–18时,整个四川盆地几乎都被一个很大尺度的强对流云团覆盖,中心TBB值最低可达190 K以下。GPM/DPR于11日18:16–18:19过

境对流云团上空,离此时段最近的云图(图2d)显示,该时段的西南涡云系中心TBB较16时有所增大,但对应的云团范围更大;20时后,西南涡云系开始逐渐减弱并分离。

如图3为2020年8月11日地面雨量站观测的2 h累积降水量分布。可见,降水量大值区域也主要位



于低涡系统的东南侧。由图3可知,10时开始,降水覆盖了大部分四川地区,10–12时的累计降水量最大可达28 mm;12–14时,在西南涡逐渐发展的同时,降水大值区与对流云团的亮温低值中心(图2b)对应;

16时,西南涡发展至成熟阶段,对应的降水强度也最大,14–16时累积雨量可达32 mm。16时后,随着西南涡强度减弱,降水量也随之减少。

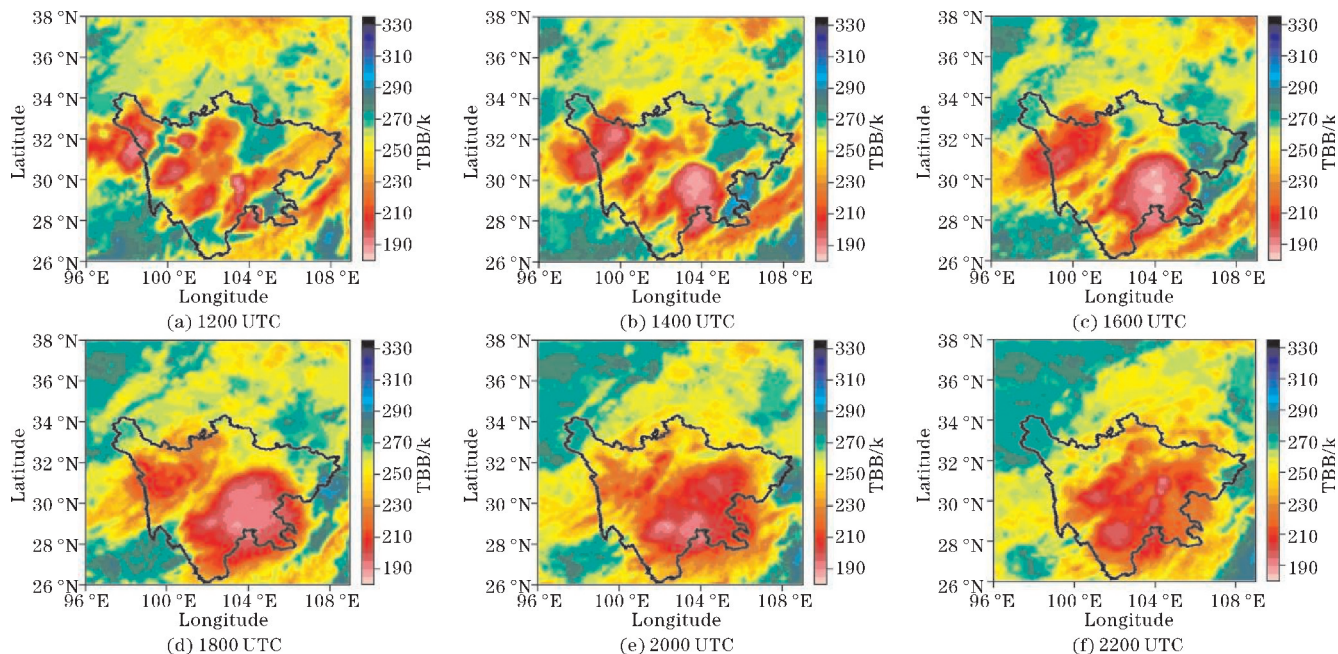


图2 2020年8月11日1200–2200 UTC的FY-2G红外亮温TBB云图

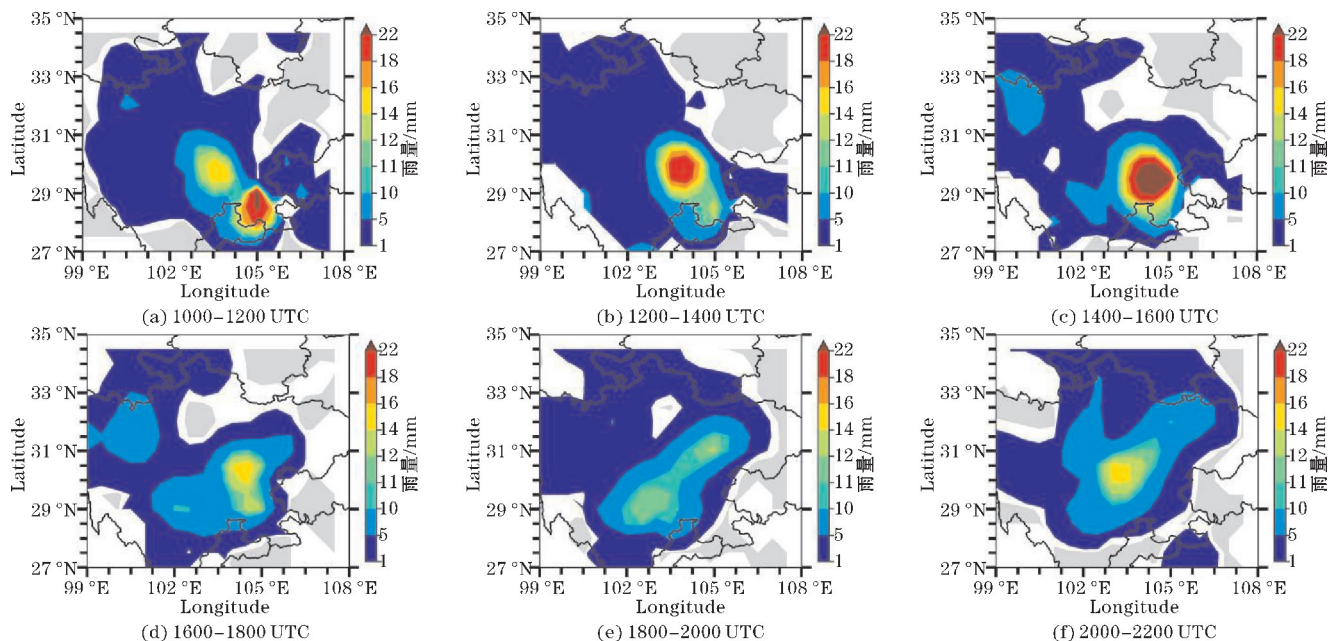


图3 2020年8月11日1000–2200 UTC地面2 h累积雨量

### 3 GPM/DPR 过境时的西南涡雨带结构

GPM/DPR 提供了3种观测模式的结果,张慕祺等<sup>[25]</sup>评估表明,DPR-MS模式的观测结果更准确、合理。因此本文利用DPR-MS资料对过境时西南涡雨带

的水平和垂直结构进行分析。如图4为GPM/DPR过境探测到的组合反射率因子、降水类型及雨顶高度。组合反射率是将雷达观测到的各高度层的反射率因子求取最大值,并投影到同一平面得到。从图4(a)和图4(b)可见,西南涡雨带整体为混合性降水,即层云降水中嵌入了强对流。

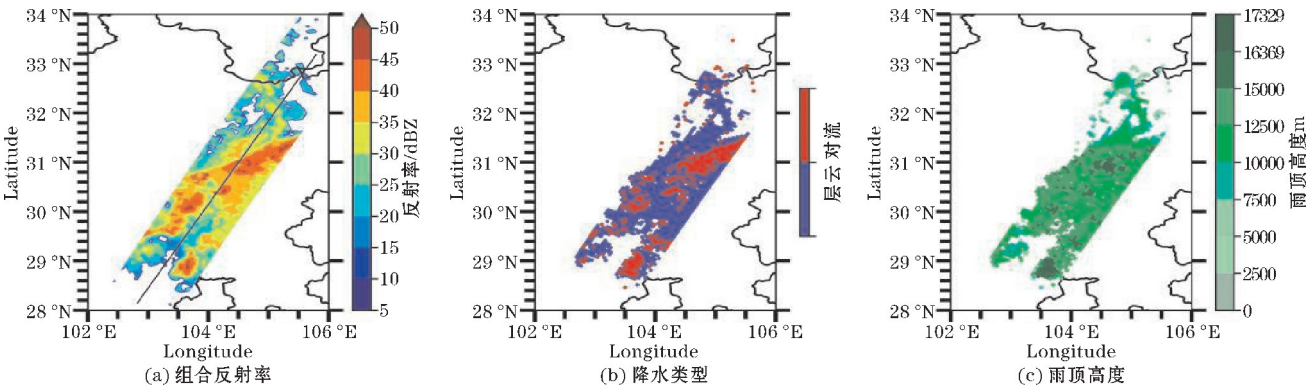


图 4 GPM/DPR 过境时的雷达组合反射率、降水类型及雨顶高度

层云降水的  $Z_e$  基本都在 40 dBZ 以下,回波面积较大且无明显的强回波中心;对流降水的  $Z_e$  集中在 35 ~ 50 dBZ,回波面积较小但有明显强回波中心。从图 4(b) 和 (c) 可见,对流降水的普遍比层云降水的高,对流降水的  $H_{ET}$  大部分为 7.5 ~ 15 km,层云降水的

$H_{ET}$  大部分为 5 ~ 12.5 km。另外发现,无论是层云降水还是对流降水,其雨顶高度大值区(14 km 以上)基本都与降水大值区对应,说明这些区域降水深厚,上升运动强烈,对应的冷雨过程活跃。

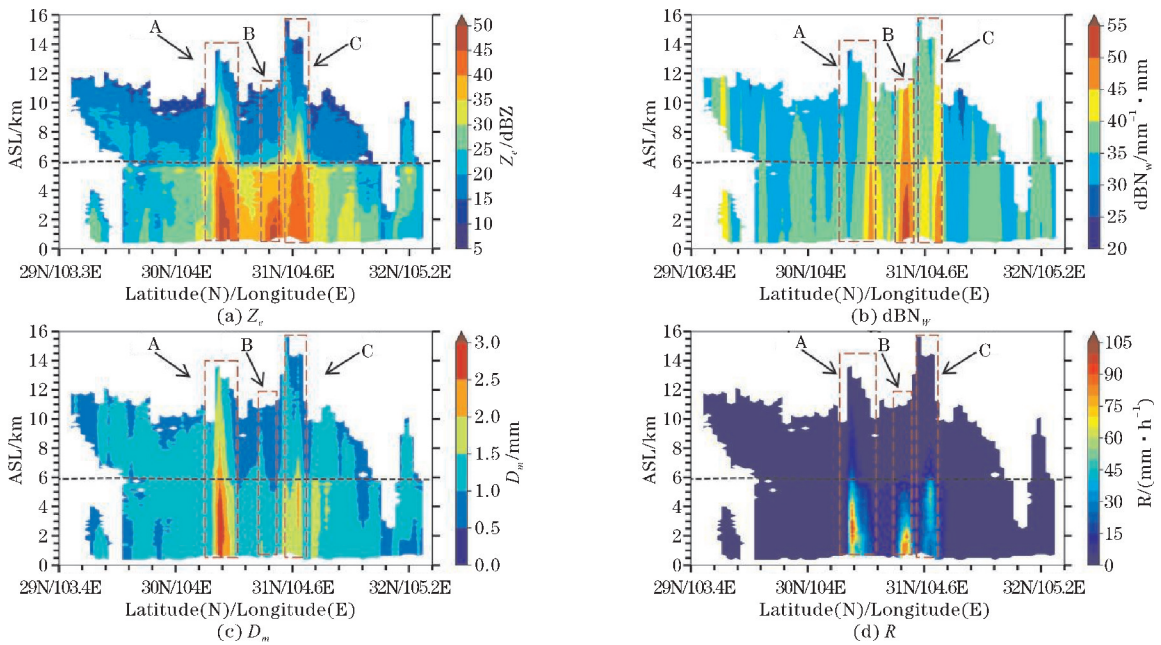


图 5 沿图 4(b) 黑色实线截取的  $Z_e$ 、 $dBN_w$ 、 $D_m$  和  $R$  垂直剖面(黑色虚线为 0 °C 层,ASL 为海拔高度)

降水垂直结构可以反应降水的动力、热力结构特征和微物理特征。图 5 为沿图 4(a) 中黑色实线的  $Z_e$ 、 $dBN_w$ [即  $10\lg(N_w)$ ]、 $D_m$  和  $R$  的垂直剖面。将 3 个强回波柱命名为单体 A、B、C,由于  $Z_e$  和  $R$  都与粒径呈正相关,即粒径越大,雷达回波及降水强度就越大。从图 5 可知,单体 A 和 C 对流发展更旺盛,单体内部产生明显更大的雨滴,且数浓度也相对较大,基本以浓度较高的中大雨滴为主;单体 B 的粒径更小,但数浓度比单体 A 和 C 更高,基本以浓度高的中小雨滴为主。因此单体 A 和 C 造成的  $R$  都相对层云降水更强,以强烈的冷云过程为主,而单体 B 的暖云过程更加活跃。两种类型造成的降水强度都很强,但机制不同。而在

强回波单体两侧的回波在冻结层有明显的亮带特征,为层云降水。相较于对流降水,层云降水的粒径与数浓度都更低,导致回波和降水强度也较低,基本以浓度略低的中小雨滴为主。

4 两类降水的垂直结构和微物理特征

为进一步分析 2 类降水的垂直结构和微物理特征的差异,图 6 给出了  $Z_e$ 、 $dBN_w$ 、 $D_m$  和  $R$  的 NCFAD、平均廓线和标准差以及平均廓线斜率。其中第 1 列和第 2 列为层云降水和对流降水的 4 类参量的 NCFAD 统计结果;第 3 列为 2 类降水中 4 类参量的平均廓线和



标准差;根据图6(c)中2类降水的在不同高度的波动幅度的不同,选取显著变化的节点,从雨顶到近地面分

为A-B、B-C、C-D和D-E 4层,对4类参量进行斜率计算,得到图6第4列。

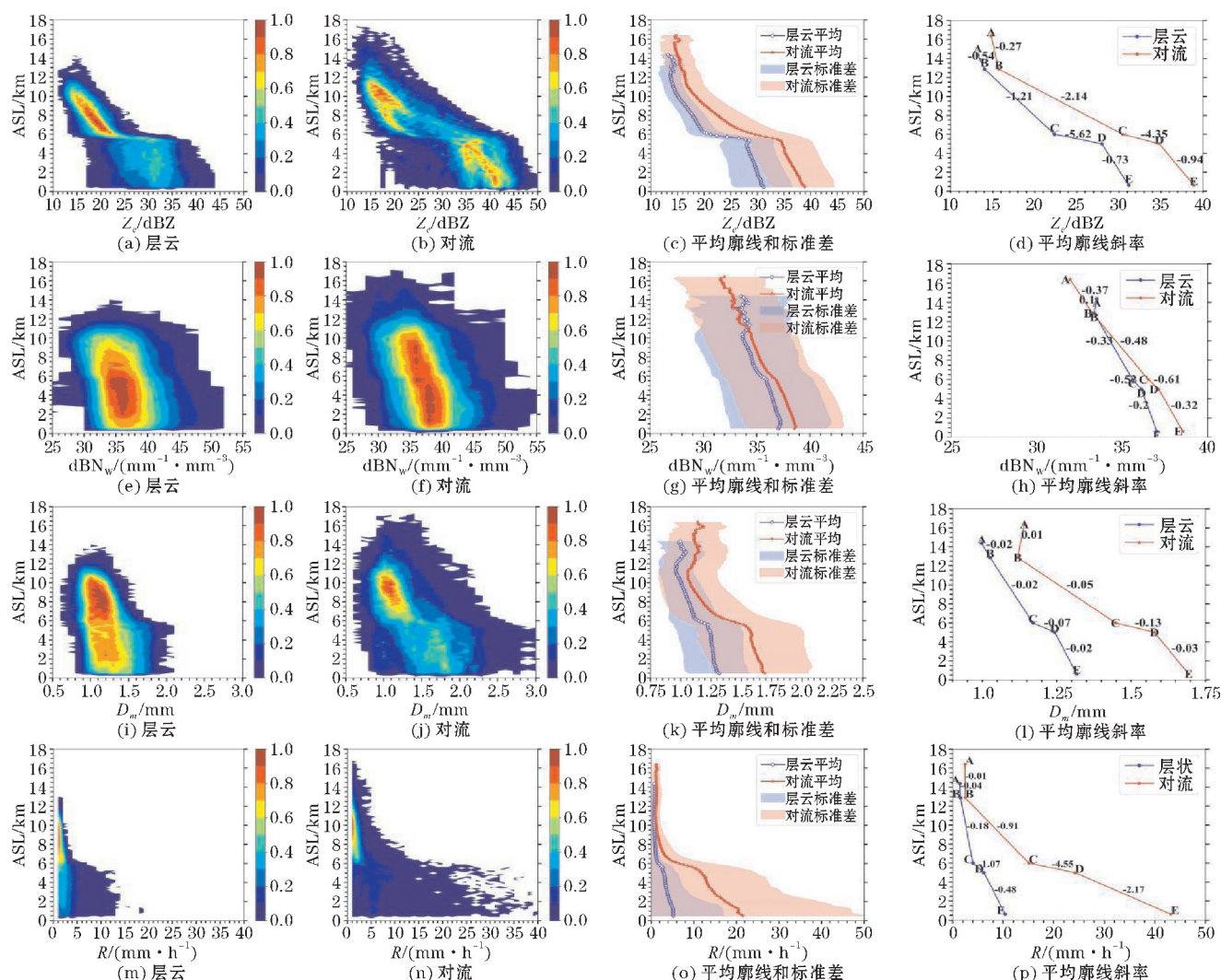


图6 层云降水和对流降水  $Z_e$ 、 $dBN_w$ 、 $D_m$  和  $R$  的 NCFAD、平均廓线以及标准差、平均廓线斜率

由图6第3列可知,两类降水的雷达物理量从雨顶到近地面的频次分布及平均廓线随高度变化的整体趋势类似,详细为:在AB段,冰相粒子基本以凝华、碰并等冰晶的缓慢增长机制为主, $dBN_w$ 、 $D_m$ 、 $Z_e$  随高度的变化较小;到BC段,由于冰晶的聚合和淞附过程,使粒子增大、数浓度变高,反射率增大;在CD段,粒子开始进入融化层,从冰相转为液相, $D_m$  和  $dBN_w$  增大导致雷达回波增强;在DE段, $D_m$  和  $dBN_w$  也在增大,以雨滴的碰并增长和潜热释放为主。如图6第2排前两列所示,层云降水的数浓度大致分布在  $25 \sim 52 \text{ mm}^{-1} \cdot \text{mm}^{-3}$ ,对流降水大致分布在  $25 \sim 55 \text{ mm}^{-1} \cdot \text{mm}^{-3}$ ,比华南地区的数浓度更高<sup>[31]</sup>。

由图6第1、3列可见,在层云降水中,冻结层以上的粒子聚并增长与淞附;当粒子达到冻结层时,分布逐渐变宽,冰晶开始融化,快速增加表现出明显的亮带特

征;之后在碰并和破碎等作用下,两个参量的分布变化不大,但数值都随高度的降低而略微增大,这表明层云降水的碰并、破碎等效率较低且缓慢<sup>[32]</sup>。不同于杜爽等<sup>[31]</sup>在华南地区的观测结论,在冻结层以下,粒径和数浓度并无明显减小趋势,说明近地表的蒸发效应并不显著。

如图6第2、4列,对流降水与华南地区对流降水的垂直结构不同<sup>[31]</sup>,此次对流降水在BC段多1个高频区,且粒径高频区的位置也更高;不同于高原涡与西南涡共同作用下的降水分布<sup>[33]</sup>,此次对流降水分布流域更宽,发展高度也更高。4个参量整体都比层云降水的增长率更大(冻结层区域的  $Z_e$  除外),水凝物的微物理过程更活跃。在BC段,数浓度与粒径更大,对流降水有更快速的冰晶增长过程;CD段,冰相过程更为活跃;DE段,高度越低粒子浓度越大,粒子半径主要

集中在1.3~2.2 mm,也有部分粒径达到2.5 mm以上,这表明对流降水的雨滴在低层处于浓度高、尺度大的活跃状态,与在低层的生长趋势一致,以碰并和破碎为主,效率明显强于层云降水。

## 5 雨滴谱特征

为进一步分析两类降水的雨滴谱差异,图7给出GPM/DPR中观测到的近地面雨滴谱分布及其他研究的结果<sup>[34]</sup>。层云降水的总样本数为918个,单个区间的最大样本数为13个;对流降水的总样本数为331个,最大样本数为6个。

Bringi等<sup>[34]</sup>发现层云和对流降水的雨滴谱一般位于分界线的左右两侧,图7中两类降水的分布与此结论一致。层云降水中 $D_m$ 和 $dBN_w$ 两类参量的均值为1.31 mm和 $37.1 \text{ mm}^{-1} \cdot \text{mm}^{-3}$ ,对流降水的平均值为1.68 mm和 $38.7 \text{ mm}^{-1} \cdot \text{mm}^{-3}$ 。两类降水的粒径平均值以及层云降水的数浓度都高于墨脱地区,而对流降水的数浓度低于墨脱地区<sup>[35]</sup>。两类降水的 $D_m$ 和对流降水的 $dBN_w$ 较为对称,接近正态分布,而层云降水的 $dBN_w$ 为正偏态,总体来说,对流降水的直方图都比层云降水的更偏向大值区,与Ji等<sup>[36]</sup>的观测结果一致。

层云降水比对流降水的分布更为集中,这与Zhang等<sup>[37]</sup>在成都近地面雨滴谱的观测结果较为一致。与Bringi等<sup>[34]</sup>对大陆和海洋对流降水的观测结果相比,海洋性对流在这一区域的样本数更多,此次对流类型更可能类似于海洋性对流。

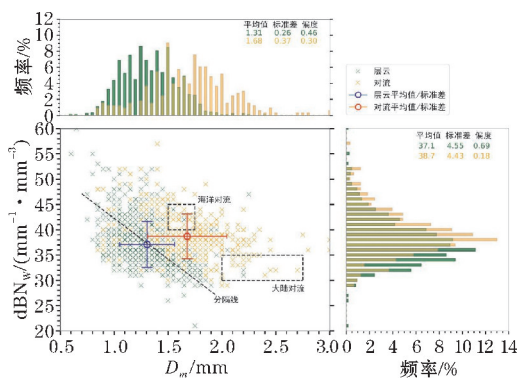


图7 层云降水(绿色)和对流降水(黄色)样本的 $D_m$ 和 $dBN_w$ 的概率分布和偏度

## 6 Z-R 关系

以 $Z=AR^b$ 形式表示的Z-R关系是雷达定量降水估算的重要基础。其中有美国夏季对流降水统计得到的

关系式 $Z=300 R^{1.4}$ <sup>[38]</sup>,另外包括适用于中纬度地区的层云降水的关系式 $Z=200 R^{1.6}$ <sup>[39]</sup>,有助于估计热带降雨量的关系式 $Z=250 R^{1.2}$ <sup>[40]</sup>。寻找合适的Z-R关系,有利于改进局部地区特定季节降水的估测,结果如图8和图9所示。其中图8为两类降水的系数A和b廓线,图9为层云降水和对流降水在近地面的Z-R关系。

从图8中可知,A和b的总体变化趋势与Das等<sup>[41]</sup>的类似。即在系数A中,冻结层以上对流降水大于层云降水,冻结层以下对流降水小于层云降水,而系数b变化则相反。系数A与雨滴尺度大小有关,随着雨滴尺度增大而增大,随数浓度增大而减小;系数b代表降水的微物理特征,随着数浓度和雨滴尺度的共同增大而增大,其中雨滴尺度为主要影响因素<sup>[42-43]</sup>。结合图8与雨滴谱的斜率(图6h、l)发现:在冻结层以上,由于对流降水的粒径比数浓度增大得更快,而层云降水的粒径比数浓度增大得更慢,所以对流降水的系数A和b都大于层云降水;在6 km附近,两类降水的粒径和数浓度增幅加大,造成层云降水的A大于对流降水,相应的系数b快速减小;在6 km以下,由于层云降水在约5.5 km处的 $D_m$ 减小更多,而对流降水的数浓度增幅更大,两个因素叠加在一起导致系数A在此高度附近都减弱至几乎相等(图6k),随后 $D_m$ 继续增大,与 $dBN_w$ 共同影响A,使层云降水的系数A增幅大于对流降水。由于两类降水的粒径和数浓度增幅相抵,所以两者的系数b波动不大;至近地面,两者的 $D_m$ 和 $dBN_w$ 都相应的增加和减少,对应的系数A和b也增大和减小。当系数b大于1时,碰并机制起主导作用<sup>[42]</sup>,由此可知层云降水在亮带以下碰并效率开始显著,而对流降水整体都以碰并为主,与图6的分析一致。

图9是通过最小二乘法拟合的近地面Z-R关系。从图可知,层云降水中Z-R关系为 $Z=387.2 R^{1.16}$ ,能较好的对应图中数据, $Z=300 R^{1.4}$ 和 $Z=200 R^{1.6}$ 对此地区都有明显的低估。对流降水的关系式为 $Z=412.6 R^{1.16}$ , $Z=250 R^{1.2}$ 对此地区有明显的高估,但与拟合的Z-R关系式非常相似,更加印证了此次对流降水偏向于海洋性对流降水。当b值相同时,A值越大则雨滴的尺度越大<sup>[44]</sup>。图9中两类降水的系数b相同,且对流降水的A值明显大于层云降水,符合前面得到的结果,即对流降水以中大雨滴为主,层云降水以中小雨滴为主。大粒径和系数A以及系数b大于1时可以造成强的低层碰并增长和较少的蒸发<sup>[42]</sup>,与图6(o)低层R持续增大以及近地面数浓度略有降低的情况(图6g)对应。



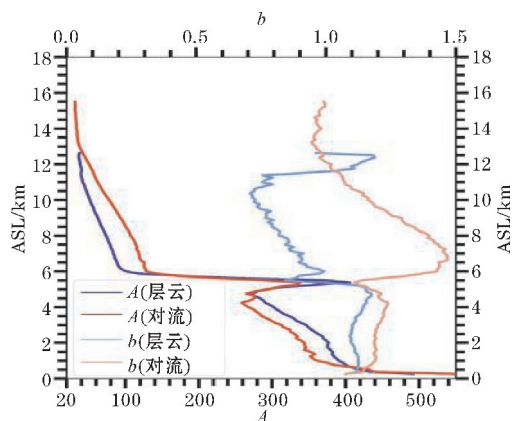
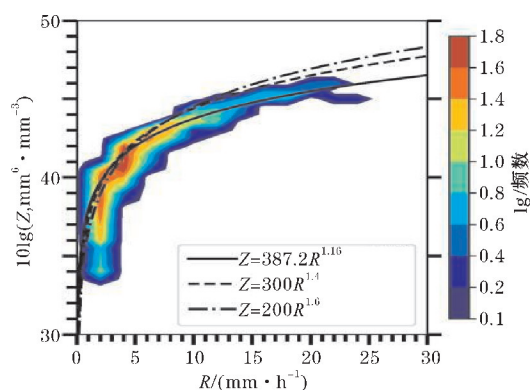
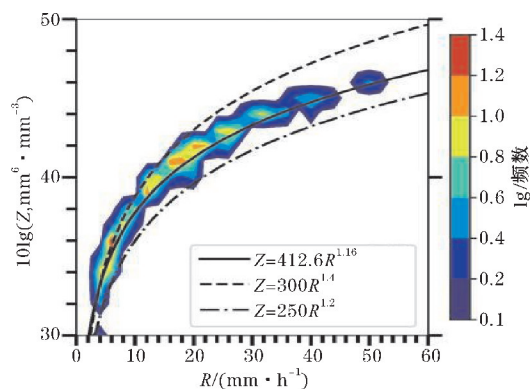


图8 层云降水和对流降水的系数  $A$  和  $b$  随高度变化的廓线



(a) 层云



(b) 对流

图9 层云降水和对流降水的  $Z$ - $R$  关系

## 7 结论与展望

研究西南涡降水垂直结构和微物理特征,对降水的预报有着重要意义和价值。本文利用全球降水测量卫星 GPM 的双频雷达 DPR 资料,结合 ERA5 再分析、FY-2G 卫星亮温和地面自动站雨量资料,对 2020 年 8 月 11 日影响四川中东部的一次典型西南涡降水的垂直结构和微物理特征进行分析,得到以下结论:

(1) 此次过程是由高原涡诱生出西南涡导致,随着时间推移,西南涡的影响范围逐渐扩大,盆地西部整

体位于槽前的正涡度区域,受偏南暖湿气流的控制。在降水的水平结构方面,此次降水为混合性降水,即层云降水中嵌入对流降水。雨带以降水范围大、降水强度弱的层云降水为主。在垂直结构方面,雨顶高度大值区与降水大值区对应,主要位于低涡系统的东南侧,对流上升运动强烈。

(2) GPM/DPR 资料研究表明,两类降水的垂直结构和微物理特征有明显的差异。层状降水的粒径小、数浓度较低,导致回波强度以及雨强也较低,基本以浓度略低的中小雨滴为主;对流降水的对流发展旺盛,内部的粒子浓度更高、粒径更大,使雷达回波和雨强也更强,基本以浓度较高的中大雨滴为主。对流降水相较于层云降水来说,雷达回波、雨强和雨滴谱参数的分布值域都更宽,发展高度更高,增长率也更大(冻结层除外),说明其水凝物的微物理过程更为活跃,体现在粒子聚合和淞附、碰并与破碎等方面。

(3) 从雨滴谱的差异来看,两类降水与前人观测的结果一致,西南涡产生的层云降水平均粒径相对于对流降水更小,数浓度更低。西南涡产生的对流降水更倾向于海洋性降水。

(4) 关于西南涡两类降水的雷达反射率和雨强关系,对流降水的乘数值明显大于层云降水,其雨滴尺度更大;对流降水的指数值比层云降水的更大比层云降水的更大,降水增长效率更高。

文中的结论仅能代表一次典型西南涡云-降水的结果,还需要对更多的西南涡降水个例进行统计分析,得到对西南涡降水更加完整、全面的认知。

## 参考文献:

- [1] 卢敬华. 西南低涡概论[M]. 北京:气象出版社, 1986:63-64.
- [2] 陈忠明,徐茂良,闫文彬,等. 1998 年夏季西南低涡活动与长江上游暴雨[J]. 高原气象,2003,22(2):163-167.
- [3] 李国平. 高原涡、西南涡研究的新进展及有关科学问题[J]. 沙漠与绿洲气象,2013:7(3).
- [4] 李跃清,徐祥德. 西南涡研究和观测试验回顾及进展[J]. 气象科技进展,2016,6(3):134-140.
- [5] 李跃清. 西南涡涡源研究的有关新进展[J]. 高原气象,2021,40(6):1394-1406.
- [6] 李国平. 青藏高原动力气象学[M]. 北京:气象出版社,2021:89.
- [7] 陶诗言. 中国之暴雨[M]. 北京:科学出版社, 1980:225.

- [8] 李国平,刘行军.西南低涡暴雨的湿位涡诊断分析[J].应用气象学报,1994,5(3):354-360.
- [9] 陶诗言,陈联寿,徐祥德.第二次青藏高原大气科学试验理论研究进展(一)[M].北京:气象出版社,1999:309-320.
- [10] 何光碧,陈静,李川,等.低涡与急流对“04.9”川东暴雨影响的分析与数值模拟[J].高原气象,2005,24(6):1012-1023.
- [11] 王晓芳,廖移山,闵爱荣,等.影响“05.06.25”长江流域暴雨的西南低涡特征[J].高原气象,2007,6(1):197-205.
- [12] 李跃清,赵兴炳,邓波.2010年夏季西南涡加密观测科学试验[J].高原山地气象研究,2010,30(4):80-84.
- [13] 马红,郑翔飏,胡勇,等.一次西南涡引发MCC暴雨的卫星云图和多普勒雷达特征分析[J].大气科学学报,2010,33(6):688-696.
- [14] 陶廷森,黄葵,陆飞,等.2011年苏南一次梅雨期大暴雨天气过程分析[C].江苏省气象学会第七届学术交流会.苏州:江苏省气象学会,2011:18.
- [15] 杜倩,覃丹宇,张鹏.利用FY-2卫星观测对一次西南低涡暴雨过程的分析研究[C].第30届中国气象学会年会-S4卫星资料在中小尺度天气分析中的应用.南京:中国气象学会,2013:44-56.
- [16] 虎莹.一次西南涡暴雨的云图和雷达特征分析[J].现代农业科技,2016(2):261-265.
- [17] 李佳颖,翟丽萍,覃月凤,等.广西一次大范围西南涡暴雨过程多尺度特征分析[J].气象研究与应用,2018,39(3):7-10.
- [18] 杨亦典,白爱娟,彭菊蓉.西南涡影响下汉中盆地一次暴雨过程MCC雷达特征[J].气象科技,2018,46(3):575-583.
- [19] 邓承之,赵宇,牟容,等.一次西南涡特大暴雨过程中MCS的演变特征[J].气象科技,2018,46(1):121-128.
- [20] 何跃,李强,刘伯骏,等.四川盆地一次西南涡作用下大暴雨过程的短时强降水分析[J].沙漠与绿洲气象,2019,13(6):29-38.
- [21] 周森,刘黎平,王红艳.一次高原涡和西南涡作用下强降水的回波结构和演变分析[J].气象学报,2014,72(3):554-569.
- [22] 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[J].大气科学,2015,39(2):249-259.
- [23] Wu Z, Huang Y, Zhang Y, et al. Precipitation characteristics of typhoon Lekima (2019) at landfall revealed by joint observations from GPM satellite and S-band radar[J]. Atmospheric Research, 2021, 260:105714.
- [24] Xu D, Shen F, Min J, et al. Assimilation of GPM Microwave Imager radiance for track prediction of typhoon cases with the WRF hybrid En3DVAR system[J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2021, 38:983-993.
- [25] 张昇祺,傅云飞. GPM卫星双频测雨雷达探测降水结构的个例特征分析[J]. 大气科学, 2018, 42(1):33-51.
- [26] 方勉,何君涛,符永铭,等.基于GPM卫星降水产品对1808号超强台风“玛利亚”降水结构的分析[J].大气科学学报,2019,42(6):845-854.
- [27] 覃丹宇,黄勇,李博,等.梅雨锋云系的模态研究I:主导模态[J].大气科学,2014,38(4):700-718.
- [28] Yuter S E, Kingsmill D E, Nance L B, et al. Observations of Precipitation Size and Fall Speed Characteristics within Coexisting Rain and Wet Snow[J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 2006, 45(10):1450-1464.
- [29] 张静,孙美.2020年8月10~14日四川盆地一次持续性暴雨过程特征及成因分析[J].高原山地气象研究,2021,41(3):50-57.
- [30] 赵玉春,王叶红.高原涡诱生西南涡特大暴雨成因的个例研究[J].高原气象,2010,29(4):819-831.
- [31] 杜爽,王东海,李国平,等.基于双频星载降水雷达GPM数据的华南地区降水垂直结构特征分析[J].热带气象学报,2020,36(1):115-130.
- [32] 李剑捷,郑佳锋,刘艳霞,等.四川盆地与周边地区的降水垂直结构和宏微观差异研究[J].气象学报,2022,80(2):205-223.
- [33] 蒲学敏.高原涡和西南涡作用下的四川盆地强降水成因和云系特征分析[D].成都:成都信息工程大学,2020.
- [34] Bringi V, Chandrasekar V, Hubbert J, et al. Rain-drop Size Distribution in Different Climatic Regimes from Disdrometer and Dual-Polarized Radar Analysis[J]. American Meteorological Society, 2003, 60:354-365.
- [35] Wang Gaili, Zhou Renran, Zhaxi Suolang, et al.



- Raindrop size distribution measurements on the Southeast Tibetan Plateau during the STEP project [J]. *Atmospheric Research*, 2021, 249: 105311.
- [36] Ji L, Chen H, Li L, et al. Raindrop size distributions and rain characteristics observed by a PAR-SIVEL disdrometer in Beijing, Northern China [J]. *Remote Sensing*, 2019, 11(12): 1479.
- [37] Zhang T, Wei W, Zheng L, et al. Characteristics and Variations of Raindrop Size Distribution in Chengdu of the Western Sichuan Basin, China [J]. *Atmosphere*, 2022, 14(1): 76.
- [38] Fulton R A, Breidenbach J P, Seo D J, et al. The WSR-88D rainfall algorithm [J]. *Weather and forecasting*, 1998, 13(2): 377–395.
- [39] Marshall J S, Palmer W M K. The distribution of raindrops with size [J]. *American Meteorological Society*, 1948, 5: 165–166.
- [40] Rosenfeld D, Wolff D B, Atlas D. General probability-matched relations between radar reflectivity and rain rate [J]. *American Meteorological Society*, 1993, 32: 50–72.
- [41] Das S, Talukdar S, Bhattacharya A, et al. Vertical profile of ZR relationship and its seasonal variation at a tropical location [C]. 2011 IEEE Applied Electromagnetics Conference (AEMC). Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2011: 1–4.
- [42] Atlas D, Ulbrich C W, Marks Jr F D, et al. Systematic variation of drop size and radar – rainfall relations [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1999, 104(D6): 6155–6169.
- [43] 冯雷, 陈宝君. 利用 PMS 的 GBPP-100 型雨滴谱仪观测资料确定 Z-R 关系 [J]. *气象科学*, 2009, 29(2): 192–198.
- [44] Maki M, Keenan T D, Sasaki Y, et al. Characteristics of the raindrop size distribution in tropical continental squall lines observed in Darwin, Australia [J]. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2001, 40(8): 1393–1412.

## Vertical Structure and Microphysical Characteristics of Clouds and Precipitation Induced by a Typical Southwest Vortex

JIANG Ye, LIU Yanxia, WEN Jun, ZHENG Jiafeng, CHENYANG Ruixue

(College of Atmospheric Sciences, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China)

**Abstract:** To further understand the influence of southwest vortex precipitation, the Global Precipitation Measurement Satellite (GPM) spaceborne dual-frequency radar (DPR) detection data from August 11, 2020, combined with the ECMWF ERA5 reanalysis data, ground automatic station data, and FY-2G satellite data, The vertical structure and microphysical characteristics of typical southwest vortex precipitation are studied. This process is caused by the southwest vortex induced by the plateau vortex, and the western part of the basin is located in the positive vorticity area in front of the trough, which is controlled by the southerly warm and wet air. The Southwest Vortex precipitation showed mixed precipitation, that is, flaky stratus precipitation mixed with massive convective precipitation. The height of the rain-top measured by the radar corresponds to the large value area of the precipitation, which reflects the strong upward convection. The radar observation results show that the vertical structure and microphysical processes of the two types of precipitation are significantly different. For stratiform precipitation, the vertical scale is large, and its echo intensity, raindrop concentration, diameters, and precipitation intensity increase with the decrease in height. The raindrop spectrum distribution is more concentrated, mainly small and medium-sized raindrops with slightly lower concentration. Above the freezing layer, the efficiency of condensation and collision-coalescence is low and slow. Below the freezing layer, the collision-coalescence is the main process. For convective precipitation, the vertical scale, raindrop diameters and concentration are larger, leading to larger echo intensity and precipitation intensity, mainly large raindrops with higher concentration. Above the frozen layer, there is rapid ice crystal growth and an active ice phase process. Below the frozen layer, collision-coalescence and shattering are the main, and the efficiency is stronger than stratiform precipitation.

**Keywords:** the Southwest vortex; GPM satellite; precipitation vertical structure; precipitation micro-properties