

李筱杨,郑佳锋,朱克云,等,2019. 基于雷达资料的一次高原涡天气云降水宏微观特征研究[J]. 气象,45(10):1415-1425. Li X Y,Zheng J F,Zhu K Y,et al,2019. Study of macro and micro properties of cloud and precipitation caused by Tibetan Plateau vortex based on radar observations[J]. Meteor Mon,45(10):1415-1425(in Chinese).

基于雷达资料的一次高原涡天气云降水 宏微观特征研究*

李筱杨 郑佳锋 朱克云 张 杰 王雨琪

成都信息工程大学大气科学学院,高原大气与环境四川省重点实验室,成都 610225

提 要: 利用常规天气资料,并结合第三次青藏高原大气科学试验(TIPEX-III)的毫米波云雷达资料和激光雨滴谱仪雨滴谱资料,对影响那曲地区的一次高原涡天气进行了综合分析,包括天气背景和云-降水水平、垂直结构和演变特征。结果表明:此次高原涡天气形成了涡旋状的云系,从垂直结构看本次过程由对流云演变为积层混合云。对流云阶段,回波多呈小面积的零星稀疏分布,持续时间较短,与此同时还伴有强烈的上升运动,云中正速度区多呈条状或细带状,云顶较高,呈“蘑菇状”,此时对应降水强度小,雨滴粒子浓度较低。混合云阶段,回波多呈整齐的片状,回波持续时间较长,云中的正速度区常呈柱状或方块状,近地面 1 km 位置处亮带明显,是由于粒子相态变化造成的,亮带以下降水粒子碰撞破碎,反射率因子明显降低,对应雨滴粒子直径多处于 1~3 mm,且浓度较大。高原涡过程中不同阶段云所对应的雷达回波结构和降水特征存在明显的差别,本研究可为高原天气预报和物理过程等研究提供一定参考。

关键词: 青藏高原,那曲,高原涡,云降水,宏微观特征,云雷达

中图分类号: P421,P457

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2019.10.008

Study of Macro and Micro Properties of Cloud and Precipitation Caused by Tibetan Plateau Vortex Based on Radar Observations

LI Xiaoyang ZHENG Jiafeng ZHU Keyun ZHANG Jie WANG Yuqi

Plateau Atmosphere and Environment Key Laboratory of Sichuan Province, College of Atmospheric Sciences,
Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225

Abstract: In order to enhance the understanding of the macro and micro physical structures and characteristics of cloud-precipitation under the plateau vortex, conventional weather data, combined with the data of millimeter-wave cloud radar and rain droplet disdrometer from TDPEX-III were used in this paper for comprehensive analysis of a plateau vortex weather which affected the Nagqu Region, including weather background, horizontal and vertical structures of cloud-precipitation and evolution characteristics. The conclusions are as follows. The vortex cloud system formed under the plateau vortex and this process evolved from convective clouds to cumulostratus mixed clouds. In the stage of convective clouds, echoes mostly distributed sparsely with small area and short duration, accompanied by strong ascending motion. The positive velocity zone in the cloud was mostly strips or thin strips, and the convective clouds had higher cloud top, which was “mushroom-shaped”. The rain intensity was weak and the concentration of droplet particles was low. In the stage of mixed clouds, the echoes were mostly in the form of regular patches

* 国家自然科学基金项目(41705008)和国家重点研发计划(2018YFC1505702)共同资助

2018 年 10 月 22 日收稿; 2019 年 3 月 21 日收修定稿

第一作者:李筱杨,主要从事雷达气象的研究. Email:928390236@qq.com

通信作者:郑佳锋,主要从事雷达气象的研究. Email:zjf1988@cuit.edu.cn

with larger area and durations were longer. The positive velocity zone in the cloud were often columnar or block-shaped. Near the surface, bright bands were obvious, caused by the phase change of the particles. Due to the collision of the precipitation particles, the reflectivity factor below the bright band was significantly reduced. Droplets were mostly in the size of 1—3 mm with larger concentrations. Thus, there are obvious differences of radar echoes and precipitation features between different stages under the process of plateau vortex, and the finding might provide some references for the research of plateau weather forecasting and physical processes.

Key words: Qinghai-Tibet Plateau, Nagqu, plateau vortex, cloud and precipitation, macro and micro properties, cloud radar

引 言

青藏高原是世界上海拔最高、地形最复杂的高原,是影响我国极端天气和气候事件的关键区之一,对亚洲季风及能量和水分循环有重要影响(Wu and Zhang 1998;赵平和陈隆勋,2000;Xu et al,2008;周秀骥等,2009)。高原涡是青藏高原的主要天气系统之一,指夏半年发生在青藏高原主体上的一种 α 中尺度低压涡旋,它主要活动在 500 hPa 等压面上,平均水平尺度为 400~500 km,垂直厚度一般在 400 hPa 以下,生命期为 1~3 d。高原涡不仅对高原地区有影响,在有利的天气形势配合下,常常还能向东运动而移出高原,引发造成我国东部和长江流域暴雨、雷暴等灾害性天气(李国平,2013)。

对于高原低涡的结构、形成与发展及其造成的天气灾害等问题的认识和研究,一直为气象学家和预报员关心、重视,并在 1979 年第一次青藏高原气象科学试验和 1998 年第二次青藏高原大气科学试验前后取得了一些研究成果(叶笃正和高由禧,1979;青藏高原气象科学研究拉萨会战组,1981;乔全明,1987;章基嘉等,1988;罗四维等,1993)。国外对青藏高原及高原低涡研究也很重视,而且多集中在数值模拟研究领域(Shen et al,1986a;1986b;Wang and Orlanski,1987;Wang,1987)。随着卫星监测资料的日益完善,对高原地区气象台站稀疏是一个有益补充,郁淑华(2002)利用日本静止气象卫星 GMS-5 分析了水汽图上的水汽涡旋,发现水汽涡旋对高原低涡的活动有指示意义;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资料也被创新性的用于高原涡降水的结构特征分析,对高原夏季降水云垂直结构的塔状特点,高原对流系统频率、发展尺度等进行研究(Fu et al,2006;Qie et al,

2014;蒋璐君等,2015)。

从目前国内外研究进展来看,对高原低涡的研究主要以天气统计分析和数值模拟试验等为主(王伏村等,2014;Yu et al,2016;李山山和李国平,2017;师锐和何光,2018;刘自牧等,2018;郁淑华和高文良,2018),对低涡过程个例研究多采用常规资料、再分析资料和卫星等,由于缺乏有效探测资料,对于低涡引发的云和降水的精细结构和微观特征研究还较少见,对其认识非常有限,远远无法满足科学和实际应用的需要。

我国第三次青藏高原大气科学试验第一阶段于 2014 和 2015 年夏季在那曲顺利完成。迄今,该项目已完成 2014、2015 年云降水物理过程外场观测试验,并同步展开地面雷达和加密探空观测工作,取得了那曲地区多种云降水综合观测数据,构建了青藏高原及周边地区三维点-面结合综合观测体系,逐步实现持续观测。本文利用第三次青藏高原大气科学试验的高分辨率雷达资料,结合其他常规资料,对 2015 年 8 月一次高原天气过程的发展演变及云-降水宏微观特征进行分析研究(刘黎平等,2015;唐洁等,2018)。对加强高原涡云-降水系统的认识有重要意义,同时为高原天气预报和物理过程等研究提供一定参考。

1 资料与方法

本文利用 2015 年 8 月 5—7 日 ERA-Interim 再分析资料和 FY-2G 逐小时红外云图亮温(TBB)资料分析此次高原涡过程的主要天气背景。其中利用气压场资料分析环流背景和高原涡的位置、强度和移动路径,水汽通量、散度通量和垂直速度资料用于分析天气形成的水汽和动力条件;利用亮温资料分析高原上降水云团的活动情况。

高原涡天气的云和降水观测地点选择在西藏那曲地区,雷达安装在那曲气象局(31.48°N、92.01°E,海拔 4507 m)(NQMET),考虑那曲为高原低涡的主要发展区域,对流过程比较频繁,代表性好,且相比于高原上其他雷达站,周边地势相对较平坦,因此资料具有较好可用性。利用 8 月 5—7 日的 C 波段新一代天气雷达(CINRAD/CD)的反射率因子和径向速度资料,研究云和降水系统的水平宏观结构特征及发展演变;利用 Ka 波段毫米波云雷达反射率因子、气流垂直速度、谱宽资料,结合激光雨滴谱仪探测的雨强、雨滴谱资料,分析云和降水的垂直结构和微观及动力特征。

本文使用的 Ka 波段毫米波云雷达是 TIPEX-III 试验的重要探测设备之一,由中国气象科学研究院联合中国航天科工集团第 23 研究所制造。该雷达具有较高的灵敏度,在 5 km 高度上,还能探测到 -38 dBz 的回波,具有非常高的时间分辨率(9 s)和空间分辨率(30 m)。

2 结果与分析

2.1 高原涡天气形势分析

如图 1 所示,2015 年 8 月 5 日 08 时,500 hPa 在亚洲中高纬地区为两槽一脊的形式,其中贝加尔湖东部的槽向南延伸到中低纬的我国华中地区,其后的高原地区形成了北脊南槽的形式,青海东南部至川西高原地区被高压脊控制,那曲以西有一大一小两个闭合低压系统生成(图 1a)。20 时低压随华中地区的大槽东移(图 1b)。6 日 08 时,两个低压系统合并,形成直径约为 800 km 的暖性高原低涡(图 1c)。同时,高原涡移至那曲附近,风场呈气旋式切变,低空气流辐合,会产生上升运动带来降水。20 时,高压脊东移至甘肃、陕西南部至四川盆地地区,高原涡随之继续东移,中心已移至那曲东侧,但该低涡尺度较大,其南侧延伸出来的槽线仍滞留在

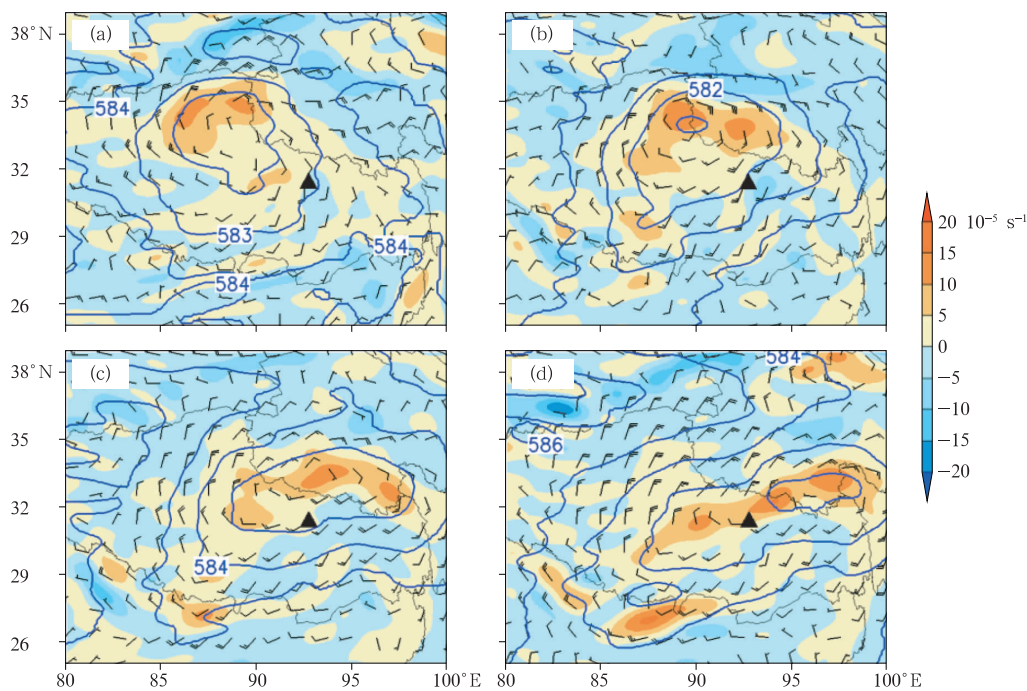


图 1 2015 年 8 月 5 日 08 时(a),5 日 20 时(b),6 日 08 时(c)和 6 日 20 时(d)500 hPa 位势场(蓝色实线,单位:dagpm)、风场(风向杆)、相对涡度(填色部分)
(▲表示那曲站)

Fig. 1 Potential field at 500 hPa (solid blue line, unit: dagpm), wind field (wind direction barb) and relative vorticity (shaded) at 08:00 BT 5 (a), 20:00 BT 5 (b), 08:00 BT 6 (c), 20:00 BT 6 (d) August 2015
(▲: Nagqu Station)

那曲以西南地区(图 1d)。此后,低压中心不断东移,7 日 08 时移出高原,进入四川境内,涡中心与滞留在高原上的槽线发生分裂。

分析大气层结稳定情况。8 月 5 日及 6 日 08 时的 CAPE 值较小,分别为 114.6 和 $87.6 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$,层结比较稳定,20 时的 CAPE 值则分别为 274.8 和 $259.3 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$;结合降水强度变化曲线(图 7e,图 8e,图 9e)进行分析,发现白天降水强度偏弱且变化幅度较为平稳,连续降水时间也偏长,可能主要受动力因素影响,而夜间的不稳定能量显著增加,降水强度增强,表现出骤升骤减的特点,在受到动力因素影响的同时还受到热力对流的影响。判断该个例为由低值系统引起、伴有局地热力作用的混合性降水过程,但以动力作用为主。

此次过程水汽条件表现为逆时针辐合到那曲附近,流场存在低层辐合、高层辐散的结构(图略),这为云和降水的形成提供了充足的水汽和动力条件。

从卫星云图看(图略),此次高原涡天气形成了涡旋状的云系,总体呈先增多再减少至再次增多最后消散的演变趋势。

2.2 水平结构及宏观特征分析

利用中国气象局在西藏那曲布网的 C 波段新一代天气雷达的最大反射率因子和径向速度资料,对那曲上空雷达回波的宏观特征进行分析。

将雷达探测的体积扫描资料中的反射率因子进行处理,就是把 9 个仰角层的反射率因子,顺次进行最大值计算,最终可以得到一张组合反射率因子图。上侧及右侧剖面图分别为雷达各仰角层反射率回波沿以那曲为中心东西(南北)方向切面的回波投影。径向速度则可以认为是风速在波束径向上的一个分量。径向速度图像中由零速度线走向和正负速度值配置可体现风场辐合辐散情况,进而帮助了解雨势发展。

由图 2 可见,8 月 5 日凌晨(图 2a)雷达扫描范围内存在零散、稀疏、面积较小的对流单体,对应反射率达到 35 dBz 左右,对流云的云顶高度达到距地面 6 km 左右,无明显合并或分散的趋势。高原地区不稳定抑制能量 CIN 较弱,会在很大范围内同时触发大量的对流云(泡),形成各种小尺度的涡旋对,但是这些对流云不能像内陆那样,进一步发展形成深厚的对流系统,这也是高原与内陆地区对流云发生发展的明显区别。在径向速度图(图 3a)中,与对流单体对应的地方负速度区内有零星块状正速度区,风向为一致的西南风。此时地面出现小规模对流降水,其强度不大,持续时间短。至 5 日中午,雷达回波无明显变化。

15:30 左右,在那曲站南侧有零散分布的对流单体逐渐生成,至 18 时汇聚成较明显的高原对流云团(图 2b),向东北方向移动,最终明显的对流回波

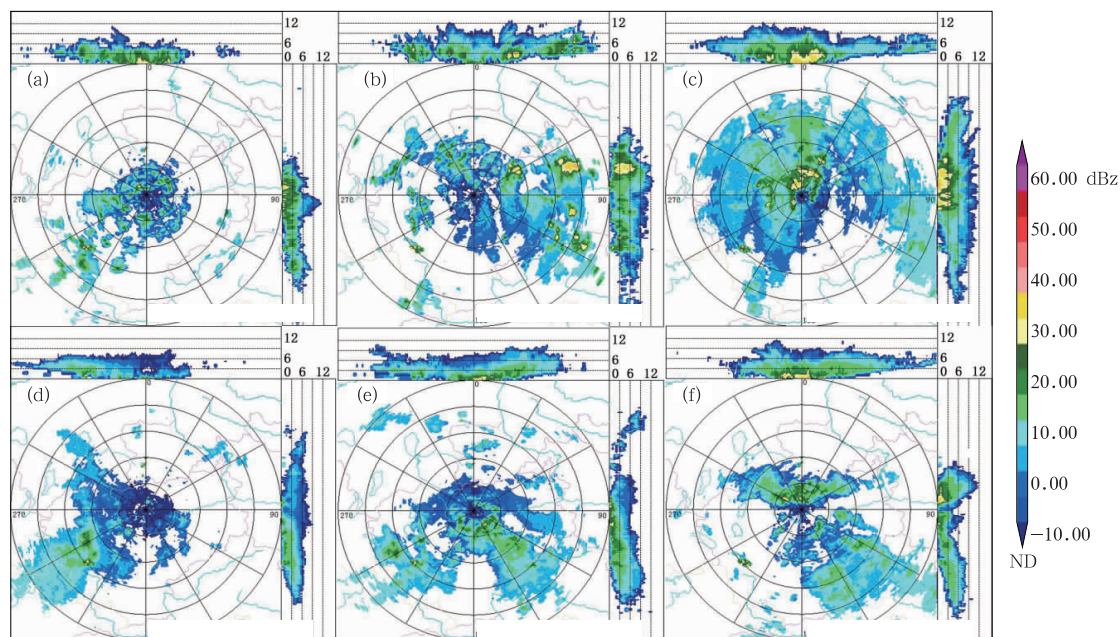


图 2 2015 年 8 月 5 日 00:24(a),18:00(b),21:23(c),6 日 08:51(d),17:59(e)和 20:23(f)的最大反射率因子(距离 120 km)

Fig. 2 Maximum reflectivity factors at 00:24 BT 5 (a), 18:00 BT 5 (b), 21:23 BT 5 (c), 08:51 BT 6 (d), 17:59 BT 6 (e) and 20:23 BT 6 (f) August 2015 (distance: 120 km)

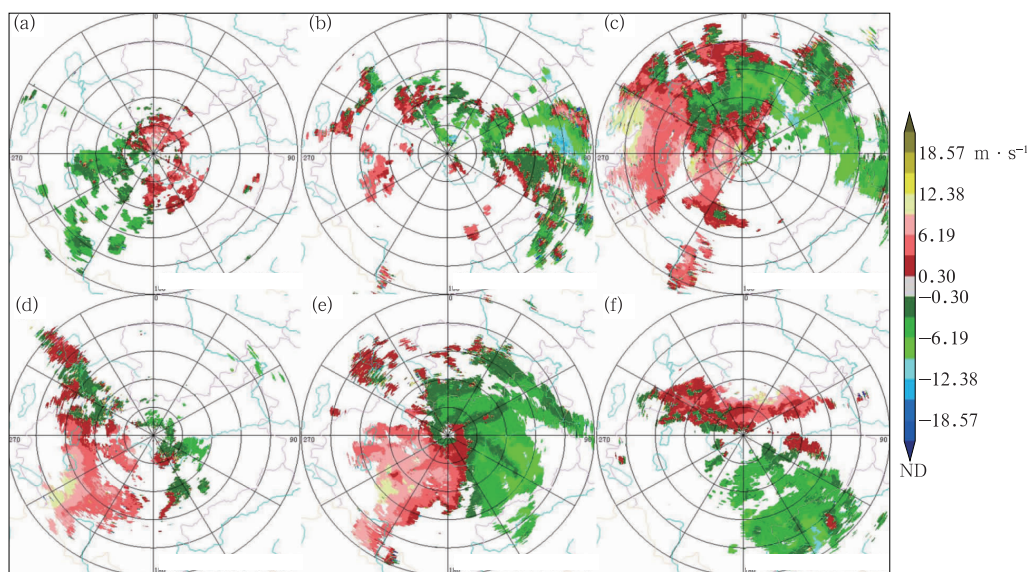


图 3 2015 年 8 月 5 日 00:24(a), 18:00(b), 21:23(c), 6 日 08:51(d), 15:19(e), 20:23(f) 的径向速度(仰角 3.4° , 距离 100 km)

Fig. 3 Radial velocity at 00:24 BT 5 (a), 18:00 BT 5 (b), 21:23 BT 5 (c), 08:51 BT 6 (d), 15:19 BT 6 (e), 20:23 BT 6 (f) August 2015 (elevation angle: 3.4° , distance: 100 km)

位于那曲东侧(方位: 71.89° 、距离: 88.88 km), 之后远离那曲站逐渐消散。此时, 在图 3b 中, 风向较为杂乱, 负速度区内有零星块状正速度区出现, 与图 3b 中的对流云团位置对应, 表明厚度区间存在明显的水平风场的垂直切变, 是中小尺度垂直环流的一种表现, 说明在一个水平尺度较小的范围内上升和下沉气流共存, 结合此时 VWP 图(雷达每个体扫资料在不同高度上通过 VAD 技术得到该高度上的平均风的风向风速)(图 4), 此时垂直风场表现为风向随高度顺转, 说明了暖平流的存在, 有利于低涡的发展和对流降水的产生。

夜间, 若干对流云团向那曲站移动且加强、合并; 至 21:23(图 2c) 移动至距离那曲站北侧 15 km 附近, 其周围发展生成大面积的层状云回波, 云顶高度约为 8 km 左右, 对流发展有所加强。在这一阶段, 雷达回波特征近乎稳定, 以大面积层状云回波为主, 回波中心存在块状的对流云, 对应在径向速度图(图 3c)和 VWP 产品图(图 5)中, 低层风场较凌乱, 有乱流存在, 高层风场呈顺时针变化, 对应为暖平流, 使不稳定能量得以积聚, 为对流发展提供必要的能量。

8 月 6 日, 从凌晨开始, 雷达最大反射率因子回波图上大部分是层状云回波, 径向速度图上以稳定的东北风为主。08:51(图 2d) 时, 在那曲站西南侧(方位角: 241.97° 、距离: 58.94 km), 发展形成一个

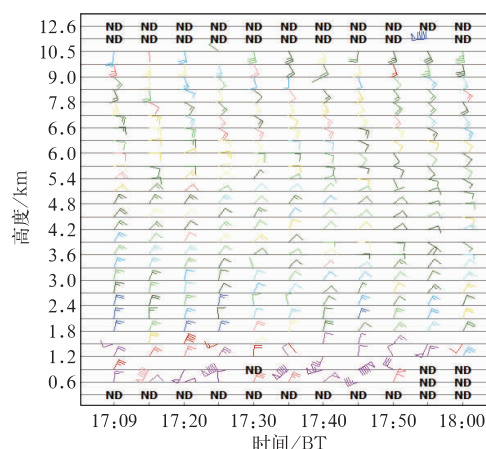


图 4 2015 年 8 月 5 日 17:09—18:00 VWP 图

Fig. 4 VWP from 17:09 BT to 18:00 BT
5 August 2015

对流云团, 回波强度偏弱, 之后该对流云团逐渐向那曲方向移动; 在径向速度图(图 3d)上, 距离那曲站 66 km 左右的西南侧区域上生成一个大风速区, 最大径向风速为 $11.31 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (风速最大值对应方位角: 239.48° 、距离: 65.84 km、高度: 4.16 km), 表示此处有急流区存在, 急流附近往往伴随有较强的风切变, 为对流降水的产生提供有力的水汽和动量条件, 对应图 2d 中那曲西南侧 60 km 左右的弱对流云。

6 日中午, 对流云团移动到那曲站西南方向, 由于东北风的影响, 不断向东北方向移动, 到 12:08

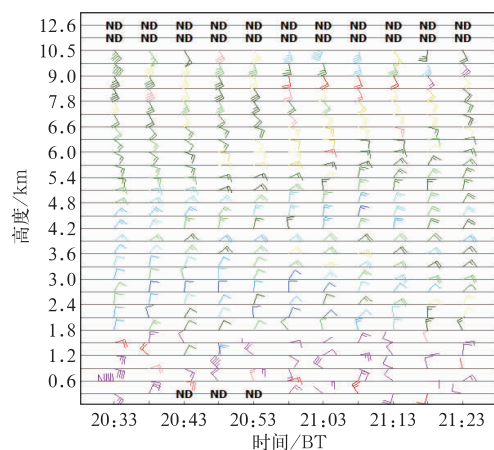


图5 同图4,但为20:33—21:23

Fig. 5 Same as Fig. 4, but from
20:33 BT to 21:23 BT

(图略),对流云团移动到那曲站东北方向(方位 28.00° 、距离15 km),所对应的最大回波反射率为40 dBz,对流云回波顶高大概维持在距地面6 km左右。午后(图3e,图6),风向整体表现为东北风,并有“S”型的零速度线出现,低层风切变强烈,正负速度交界处存在明显的辐合、辐散,有利于不稳定能量的积聚。细带状的零速度线一直持续到16时左右,此后便有分散趋势直至完全消失。

到傍晚17:59(图2e)最大反射率回波仍表现为以层状云为主的混合云回波,云体所对应的最大回波反射率较低,云顶高度有所升高,最高达到10 km左右,相较于上一阶段,对流有所发展。

20:23(图2f),云体以那曲为中心,分为南北两片,回波强度变化不大。风向表现为一致的南风,正速度区内有零星、块状负速度区存在;至22:01时,风向转为西南风,回波均远离那曲上空。

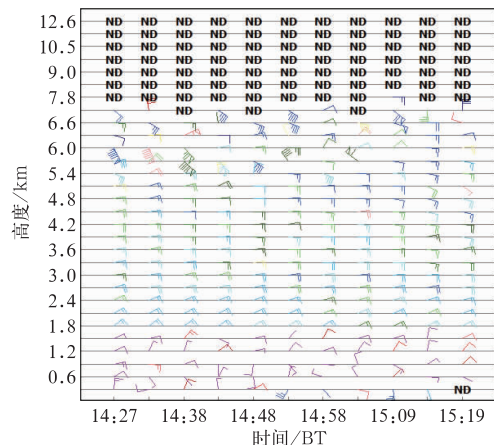


图6 同图4,但为6日14:27—15:19

Fig. 6 Same as Fig. 4, but from 14:27 BT
to 15:19 BT 6 August 2015

综上所述,从雷达回波水平特征看,本次过程由对流云发展为积层混合云。对流云阶段,对流回波多呈小面积的零星稀疏分布,持续时间较短,一般仅有几小时;混合云阶段,回波多呈整齐的片状,面积较对流阶段有增大趋势,回波持续时间较长,一般可达十几小时,随着低值系统的移动,云系会有分裂甚至消散的变化。径向速度图上有明显辐合、辐散、暖平流等存在,对应云系中对流单体的存在与降水的产生。

2.3 垂直结构及微观特征分析

从垂直探测的毫米波云雷达的反射率因子、径向速度、谱宽资料分析云系的演变过程和垂直结构,结合降水强度和雨滴谱的变化,研究本次高原涡天气的云和降水过程。

这部垂直定向探测的Ka波段毫米波云雷达拥有较好灵敏度,能够较好测量上空的云和弱降水,利用其高分辨率的观测量和反演量对高原涡条件下云和降水的垂直结构和微观特征进行研究。

由于雷达探测反演的径向速度包含了粒子在静止空气中的下落末速度和大气垂直运动速度,因此径向速度利用一种基于功率谱小粒子示踪的方法来反演出大气垂直速度和粒子平均下落速度(Shupe et al, 2008)。

从云雷达回波情况来看,本次高原涡控制时间内的主要回波集中在4日21时至6日23时。受不同动力、热力和地形等影响,此次天气过程形成的云和降水在不同阶段有所不同,整体来看,在4日夜晚到5日中午(图7)以对流云为主,5日下午至6日早晨(图8)为混合云,但对流仍然较为活跃,6日中午至午夜(图9)则为对流性很弱的混合云。因此,分三个阶段进行分析。

2.3.1 对流云降水过程

4日20:25至5日00时雷达上空存在两层云,低空3 km左右的积云和高空7~9 km左右的高积云。低空积云回波较强,从回波下垂的结构可见,积云产生了微弱的降水,但是大部分在空中被蒸发掉。高积云回波较弱,最强不超过0 dBz。从图7c看出,积云云系被大气正、负速度小值区相互契合的嵌套覆盖,对应云中弱的气流上升运动。谱宽值和粒子垂直下落速度则表现为相对均匀的较小值,表示此时云粒子较为稳定,直径发展较小。

随后,从5日00时开始,雷达上空出现了较强的对流云,在00:10左右反射率因子出现极大值,达到30 dBz,高原对流云中大气表现为强的上升运

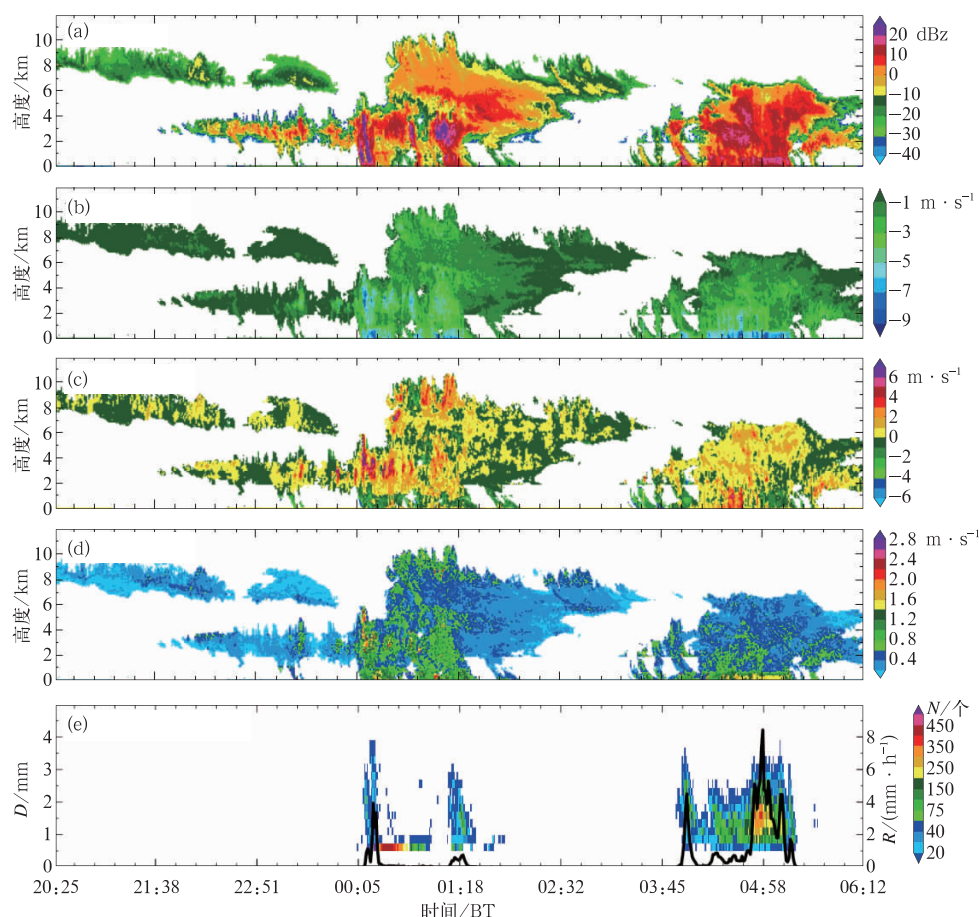


图 7 2015 年 8 月 4 日 20:25 至 5 日 06:12 那曲雷达回波

(a) 反射率因子, (b) 粒子下落速度, (c) 大气垂直速度, (d) 谱宽, (e) 雨滴谱 (D) 和雨强 (黑线)

(图 7e 中, 黑线为雨强, 彩色阴影为雨滴谱个数)

Fig. 7 Radar echoes of Nagqu from 20:25 BT 4 to 06:12 BT 5 August 2015

(a) reflectivity factor, (b) mean particle falling speed, (c) vertical air velocity,

(d) spectral width, (e) droplet size distribution (D , shaded) and rain intensity (R , black line)

(In Fig. 7e, color shaded is droplet number)

动, 00:09—00:19 地面有骤升骤降的降水峰值出现, 最大雨强为 $3.79 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 。雨滴谱上粒子直径从 $1 \sim 4 \text{ mm}$ 不等, 由于粒子大小不同, 在粒子下落速度图上可以看到空间内粒子的下降速度存在差异, 因此谱宽图上对应有大值区的出现。00:30 左右云顶高上升, 达到 10.8 km , 云顶出现块状正速度区, 面积增大, 上升运动速度达到 $4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 对流发展旺盛。此时雨滴谱中粒子直径明显减小, 多在 1 mm 左右, 小粒子浓度较高。粒子大小分布较集中, 下落速度分布较为均匀, 谱宽值减小, 地面观测到稳定的微量降水。直到 01:00 左右, 反射率因子再次出现 $>30 \text{ dBz}$ 的大值区, 对应大粒子 (直径在 3 mm 左右) 的出现, 形成与第一阶段类似的短暂降水峰值。这次降水过程中的两个峰值均对应有较强的雷达回波, 但尺度较小, 考虑是由局地热对流引起

的。随后大概有 90 min 的时间, 反射率因子回波减弱, 大气垂直速度再次出现正负速度嵌套的形式, 但绝对值均不大, 谱宽值处于 $0.4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以内, 可见此阶段的云内粒子较为稳定, 无明显变化。

04 时左右尺度较小的对流云消散并有较大尺度积层混合云出现, 回波强度仍较高, 云顶高度降低至 7 km 左右。由图 8a 可以看到, 该云团存在两块反射率因子大值区, 第一部分出现在 04:20—04:50 左右, 高度在 $2 \sim 6 \text{ km}$, 与大气垂直运动的块状正速度区对应, 因此是由上升引起的对流云团发展, 此时零度层以上 $1 \sim 2 \text{ km}$ 处有反射率因子暗带出现, 表现为反射率因子随高度降低, 是由于大冰晶衰减较强及非瑞利散射引起的 (吴举秀等, 2014); 第二部分反射率因子大值区出现在 04:50—05:10 左右的近地面 ($<1 \text{ km}$) 附近, 此时粒子下落速度在近地面附近

也对应有明显的大值区存在,考虑是由于粒子相态的变化:下落的冰晶和雪花在 0°C 层附近融化,表面变得湿润,出现强烈的碰并聚合作用,使粒子尺度显著增大,散射能力也大大增强,反射率回波强度增大,而当冰晶和雪花完全融化为水滴后,由于表面张力作用,降水粒子迅速转化为近似球形的雨滴,其降落速度远大于冰晶和雪花(孙天义和贺宏兵,2011),因此在 0°C 层亮带对应的粒子下落速度及谱宽都显著增大。相应地,该时段的雨滴浓度和降水强度较前一阶段均明显增加,其中 2 mm 左右的雨滴粒子最多,最大雨滴直径达到了 4 mm,雨滴浓度极值区与最强降水强度对应,出现在 04:48,降水强度达到 $7.94\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 。此时在近地面融化层中,不同相态、不同尺度的降水粒子下落速度相差巨大,对应谱宽亮带出现。05 时后云顶高降至 3 km,回波强度减弱,云内径向速度和谱宽均表现为稳定的小值,

降水结束。

2.3.2 强对流混合云和降水过程

8 月 5 日 17 时,在 2~10 km 高度处出现主要由冰晶组成的中高云,云内有明显的上升运动存在,速度最大值为 $7\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,出现在云顶 8 km 的位置,说明此处冰晶粒子碰并增长,反射率因子回波中出现了 30 dBz 的大值区,粒子下落速度和谱宽图中可以看到小尺度的不均匀变化,此时地面对应有短暂的对流性降水,此次降水最大强度未达到 $1\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$,雨滴浓度较小,直径 $<3\text{ mm}$ (图 8)。随后,云系逐渐消散。到 20 时,大尺度积层混合云出现,云顶高度近 12 km;高原低涡前部上升运动强,大气垂直速度表现为大面积的正值区,上升运动最大可达到 $7\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,出现在 21:20 左右,对流发展旺盛,反射率因子随高度降低而增大,表示粒子在下落过程中逐渐增长,粒子下落速度和谱宽均有从

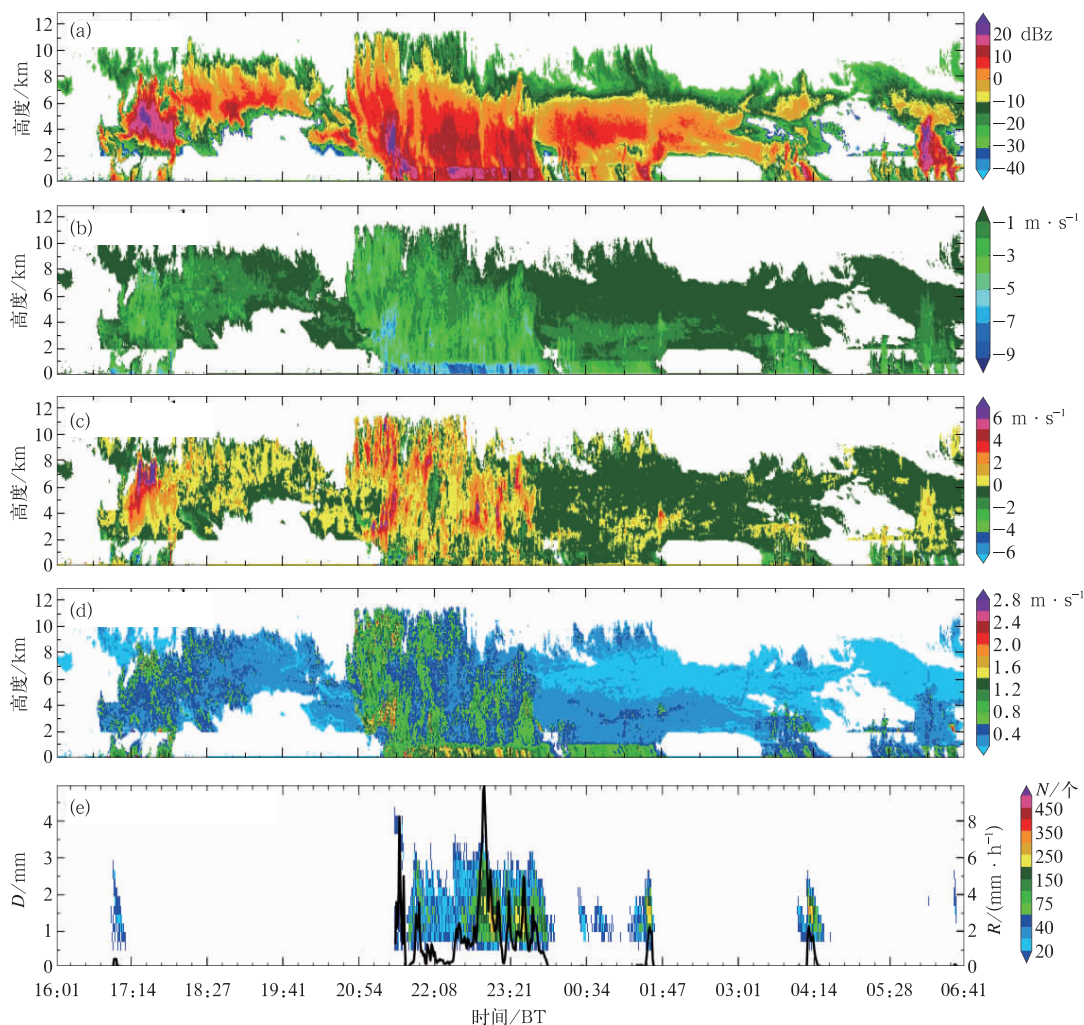


图 8 同图 7,但为 8 月 5 日 16:01 至 6 日 06:41 雷达回波

Fig. 8 Same as Fig. 7, but for the radar echoes from 16:01 BT 5 to 06:41 BT 6 August 2015

低空到高空的大范围大值区出现,说明粒子相态、直径发展不均匀,有大粒子的出现。此时地面降水达到该阶段的第一个峰值,雨强最大值出现在 21:33,达到了 $6.67 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$,雨滴谱上最大粒子直径达到了 5 mm 左右,但粒子浓度较低。此后,雷达回波强度有所减弱,云顶降低至 8 km 左右,在近地面处 ($<1 \text{ km}$) 反射率因子、粒子下落速度和谱宽值均有明显稳定的亮带,表示处于稳定的以层状云为主的降水过程,有下落的雪花和冰晶在距地面 1 km 处融化,发生了相态的变化,由于高原地区 0°C 层高度较低,这一层次上升速度较小。降水经历了两次骤升骤降的过程,在 22:55 和 23:33 分别有一大一小两个峰值出现,降水强度最大值分别达到了 11.18 和 4.30 mm ,对应雨滴谱上出现了两个粒子浓度大值区。23:50 左右,降水强度减弱至完全停止。此后,雷达回波明显减弱,云体趋于稳定。到次日 06:41 为止,地面出现两次由局地热对流引起的短时降水。

2.3.3 弱对流混合云和降水过程

6 日 07:54 左右,大尺度混合云开始出现,初始阶段雷达回波不强 ($<15 \text{ dBz}$),云体大部分为负速度区,有较弱的上升运动,正速度约为 $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (图 9)。云顶的正速度区,可能是由“夹卷效应”导致的,即在“开放系统”中,混合了卷入的外部空气或流失了内部的上升气流;云底的正速度区则是较弱对流云系引发的。此时地面观测到微量降水,强度 $<1 \text{ mm}$,雨滴粒子直径、浓度均较小。09 时,云系主要表现为层状云的特征,云顶高降到了 8 km 以内,回波强度同前一天的相比有所减弱。反射率因子、粒子下落速度及谱宽回波在中高层维持为稳定的较小值,但在近地层 ($<1 \text{ km}$) 始终伴有亮带出现,低层反射率因子也明显大于中高层,反映了粒子相态的变化。这一阶段,降水较稳定,总体维持在 $5 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 之内,雨滴直径在 $1 \sim 3 \text{ mm}$,浓度分布较均匀。16 时左右,该云体消散。其后在 17:10 左右开始有尺度较小的混合云出现,地面对应出现小

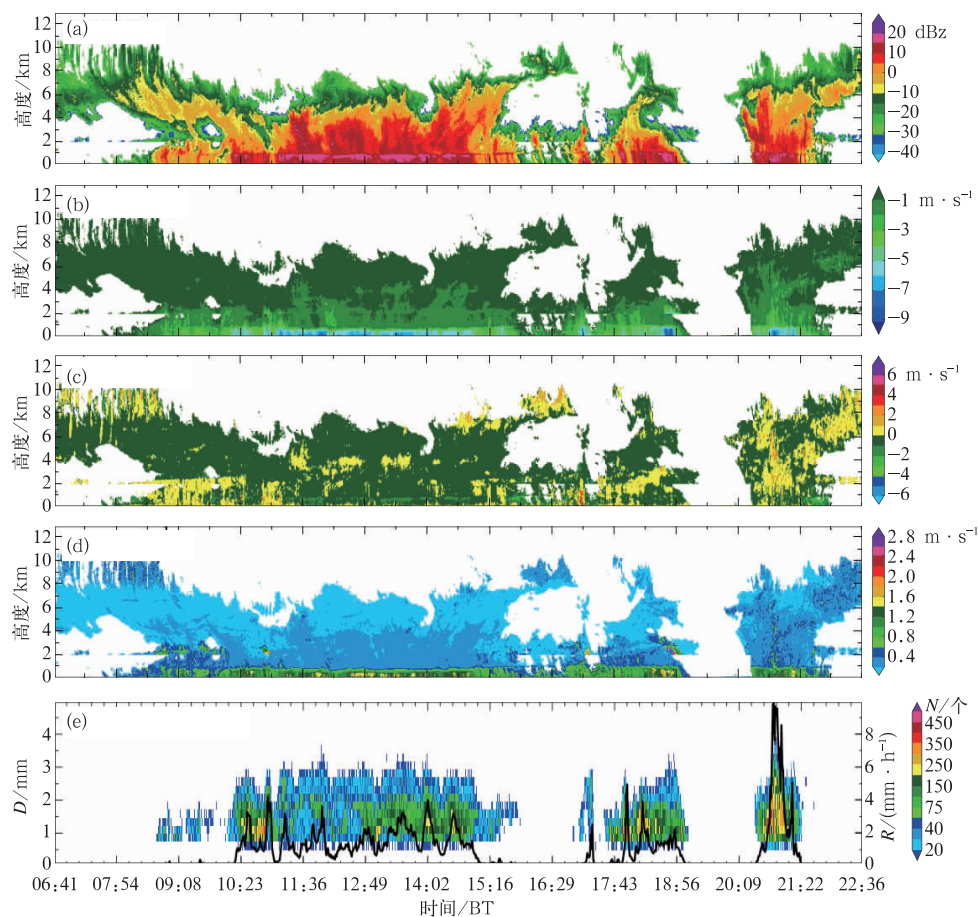


图 9 同图 7, 但为 6 日 06:41—22:36 雷达回波

Fig. 9 Same as Fig. 7, but for radar echoes from 06:41 to 22:36 BT 6 August 2015

规模降水,雷达回波较前一阶段减弱,雨滴谱特征与前次类似。到20时,出现“火苗状”的小尺度积层混合云,回波强度较大,大气以上升运动为主,速度仍不大(在 $1\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 左右)谱宽和粒子下落速度在近地面处依然有明显的亮带,地面再次有降水产生,雨滴谱上雨滴浓度和大小均明显增大。此次降水强度最高达到 $17.20\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ (20:52),为本次高原涡天气降水过程的极值,这是由于此时那曲有不稳定能量的积累,短时强降水在受到动力因素影响的同时还受局地热力对流的影响。

综上所述,高原涡过程中不同阶段所对应的雷达回波结构和降水特征存在明显的差别。对流云阶段,回波云顶较高,集中在 $10\sim 12\text{ km}$;云顶呈“蘑菇状”,与此同时还伴有强烈的上升运动,最大正速度值约为 $8\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,云中正速度区多呈条状或细带状,每个正速度区均有与之对应的谱宽、粒子下落末速度大值区,对应降水持续时间短、降水强度小,雨滴粒子发展不均匀,且浓度较低,主要受局地热力作用影响。混合云阶段,回波的云顶高度较低,集中在 $7\sim 9\text{ km}$,云顶更为平滑整齐,云中的正速度区常呈柱状或方块状,对应上升速度最大值基本多集中在 $0\sim 2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,近地面处反射率因子、粒子下落末速度、谱宽亮带明显。对应降水持续时间长、降水强度大,雨滴粒子直径多处于 $1\sim 3\text{ mm}$,且浓度较大,更多的是受动力因素所控制。

3 结 论

高原涡不仅是高原地区主要降水系统,同时也会带来下游地区的灾害性天气,但由于缺少高分辨率的雷达观测资料,目前人们对高原涡产生的云-降水微观结构和特征还了解有限。本文利用FY-2G的TBB资料、ERA-Interim再分析资料、新一代天气雷达资料,并结合第三次青藏高原大气科学试验TIPEX-III的毫米波云雷达资料和激光雨滴谱仪雨量资料,对2015年8月5—7日影响那曲地区的一次高原涡天气进行了综合分析,包括高低空的环流背景、位置、强度、移动路径、水汽条件、动力条件和云降水垂直结构和演变特征,得到结论如下:

(1) 此次高原涡天气形成了涡旋状的云系,云系以对流云和积层混合云为主。在回波的水平特征方面,对流云阶段,回波多呈小面积的零星稀疏分布,持续时间较短;混合云阶段,回波多呈整齐的片状,面积较对流阶段有增大趋势,回波持续时间较长,随着

低值系统的移动,云系会有分裂甚至消散的变化。

(2) 此次高原涡云降水分对流云降水过程和积层混合云降水过程。在回波的垂直结构和回波特征方面,对流云阶段,回波云顶较高,集中在 $10\sim 12\text{ km}$ 范围内;云顶呈“蘑菇状”,与此同时还伴有强烈的上升运动,最大正速度值约为 $8\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,云中正速度区多呈条状或细带状。层状云为主的阶段,回波的云顶高度较低,集中在 $7\sim 9\text{ km}$ 内,云顶更为平滑整齐,云中的正速度区常呈柱状或方块状,对应上升速度最大值基本多集中在 $0\sim 2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,近地面 1 km 处反射率因子亮带明显,是由于降水粒子的相态变化产生的,有对应的粒子下落末速度、谱宽大值区存在,亮带以下降水粒子碰撞破碎,反射率因子明显降低。

(3) 在对流云阶段,环流场中低涡特征不明显,大气层结不稳定能量偏高。对应降水持续时间短、降水强度小;雨滴粒子发展不均匀;主要受局地热力作用影响。而混合云阶段,多受低涡系统的影响,对应降水持续时间长、降水强度大;雨滴粒子直径多处于 $1\sim 3\text{ mm}$,且浓度较大;可见更多的是受动力因素所控制。

(4) 高原涡过程中不同阶段所对应的雷达回波结构和降水特征存在明显的差别,本文针对不同类型云和降水的时空分布、垂直精细结构及其宏微观变化规律进行研究有助于深入了解云和降水的形成机制,一方面对高原涡影响下的短时临近天气预报起到指导意义,另一方面可为检验和改进模式中云和降水的模拟过程提供参考依据。

参考文献

- 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. Jiang L J, Li G P, Wang X T, 2015. Comparative study based on TRMM data of the heavy rainfall caused by the Tibetan Plateau vortex and the southwest vortex[J]. Chin J Atmos Sci, 39(2):249-259 (in Chinese).
- 李国平,2013.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,7(3):1-6. Li G P, 2013. Advances in Tibetan Plateau vortex and southwest vortex research and related scientific problems[J]. Desert Oasis Meteor, 7(3):1-6 (in Chinese).
- 李山山,李国平,2017.一次高原低涡与高原切变线演变过程与机理分析[J].大气科学,41(4):713-726. Li S S, Li G P, 2017. Evolution and mechanism analysis of a plateau vortex and plateau shear line[J]. Chin J Atmos Sci, 41(4):713-726 (in Chinese).
- 刘黎平,郑佳锋,阮征,等,2015.2014年青藏高原云和降水多种雷达综合观测试验及云特征初步分析结果[J].气象学报,73(4):635-647. Liu L P, Zheng J F, Ruan Z, et al, 2015. The preliminary analyses of the cloud properties over the Tibetan Plateau

- from the field experiments in clouds precipitation with the various radars[J]. *Acta Meteor Sin*, 73(4):635-647(in Chinese).
- 刘自牧,李国平,张博,2018.高原涡与高原切变线伴随出现的统计特征[J]. *高原气象*, 37(5):1233-1240. Liu Z M, Li G P, Zhang B, 2018. Statistical characteristics of the concurrence between Qinghai-Tibetan Plateau vortex and Qinghai-Tibetan Plateau shear line[J]. *Plateau Meteor*, 37(5):1233-1240(in Chinese).
- 罗四维,何梅兰,刘晓东,1993.关于夏季青藏高原低涡的研究[J]. *中国科学(B辑)*, 23(7):778-784. Luo S W, He M L, Liu X D, 1993. Research on the low vortex of the Tibetan Plateau in summer[J]. *Sci China Ser B*, 23(7):778-784(in Chinese).
- 青藏高原气象科学研究拉萨会战组,1981.夏半年青藏高原500毫巴低涡切变线的研究[M].北京:科学出版社:1-7. Qinghai-Tibet Plateau Meteorological Research Lhasa Battle Group, 1981. Study on 500 mb Low Vortex Shear Line in Qinghai-Tibet Plateau During the Summer Half Year[M]. Beijing: Science Press: 1-7(in Chinese).
- 乔全明,1987.夏季500 hPa移出高原低涡的背景场分析[J]. *高原气象*, 6(1):45-55. Qiao Q M, 1987. The environment analysis on 500 hPa vortexes moving eastward out of Tibet Plateau in summer[J]. *Plateau Meteor*, 6(1):45-55(in Chinese).
- 师锐,何光,2018.移出高原后长生命史高原低涡在不同移动路径下的大尺度环流特征及差异[J]. *气象*, 44(2):213-221. Shi R, He G, 2018. Comparison analysis of circulation features of different moving tracks of long-life-cycle plateau vortexes moving out of the plateau[J]. *Meteor Mon*, 44(2):213-221(in Chinese).
- 孙天义,贺宏兵,2011.稳定性降水融化层在风廓线雷达资料中的特征[J]. *广东气象*, 33(1):48-50. Sun T Y, He H B, 2011. Characteristics of stable precipitation melting layer in wind profile radar data[J]. *Guangdong Meteor*, 33(1):48-50(in Chinese).
- 唐洁,郭学良,常伟,2018.青藏高原那曲地区夏季一次对流云降水过程的云微物理及区域水分收支特征[J]. *大气科学*, 42(6):1327-1343. Tang J, Guo X L, Chang Y, 2018. Cloud microphysics and regional water budget of a summer precipitation process at Naqu over the Tibetan Plateau[J]. *Chin J Atmos Sci*, 42(6):1327-1343(in Chinese).
- 王伏村,付双喜,张德玉,等,2014.一次引发河西走廊大暴雨的高原低涡的机制分析[J]. *气象*, 40(4):412-423. Wang F C, Fu S X, Zhang D Y, et al, 2014. Mechanism analysis of the plateau vortex triggered rainstorm in Hexi Corridor[J]. *Meteor Mon*, 40(4):412-423(in Chinese).
- 吴举秀,魏鸣,周杰,2014.94 GHz云雷达回波及测云能力分析[J]. *气象学报*, 72(2):402-416. Wu J X, Wei M, Zhou J, 2014. Echo and capability analysis of 94 GHz cloud radars[J]. *Acta Meteor Sin*, 72(2):402-416(in Chinese).
- 吴永森,1964.高原夏季500 hPa低涡的初步研究[C]//青海省气象论文集(二). 18-19. Wu Y S, 1964. Preliminary study on 500 hPa low vortex in plateau in summer[C]// *Proceedings of Qinghai Province Meteorological Papers*. 18-19(in Chinese).
- 叶笃正,高由禧,1979.青藏高原气象学[M].北京:科学出版社:122-126. Ye D Z, Gao Y X, 1979. *Qinghai-Tibet Plateau Meteorology* [M]. Beijing: Science Press: 122-126(in Chinese).
- 郁淑华,2002.高原低涡东移过程的水汽图像[J]. *高原气象*, 21(2):199-204. Yu S H, 2002. Water vapor imagery of vortex moving process over Qinghai-Xizang Plateau[J]. *Plateau Meteor*, 21(2):199-204(in Chinese).
- 郁淑华,高文良,2018.冷空气对夏季高原涡移出高原后长久与短期活动影响的对比分析[J]. *大气科学*, 42(6):1297-1326. Yu S H, Gao W L, 2018. A comparative analysis of cold air influences on short-and long-time maintenance of the Tibetan Plateau vortex after it moves out of the plateau[J]. *Chin J Atmos Sci*, 42(6):1297-1326(in Chinese).
- 章基嘉,朱抱真,朱福康,等,1988.青藏高原气象学进展[M].北京:科学出版社:181-183. Zhang J J, Zhu B Z, Zhu F K, et al, 1988. *Progress in Meteorology of the Tibetan Plateau* [M]. Beijing: Science Press: 181-183(in Chinese).
- 赵平,陈隆勋,2000.青藏高原大气热量源汇在海-地-气相互作用准4年振荡中的作用[J]. *科学通报*, 45(15):1666-1671. Zhao P, Chen L X, 2001. Role of atmospheric heat source/sink over the Qinghai-Xizang Plateau in quasi-4-year oscillation of atmosphere-land-ocean interaction[J]. *Chin Sci Bull*, 46(3):241-245(in Chinese).
- 周秀骥,赵平,陈军明,等,2009.青藏高原热力作用对北半球气候影响的研究[J]. *中国科学:D辑:地球科学*, 39(11):1473-1483. Zhou X J, Zhao P, Chen J M, et al, 2009. Impacts of thermodynamic processes over the Tibetan Plateau on the Northern Hemispheric climate[J]. *Sci China Ser D:Earth Sci*, 39(11):1473-1483(in Chinese).
- Fu Y F, Liu G S, Wu G X, et al, 2006. Tower mast of precipitation over the central Tibetan Plateau summer[J]. *Geophys Res Lett*, 33(5):L05802.
- Qie X S, Wu X K, Yuan T, et al, 2014. Comprehensive pattern of deep convective systems over the Tibetan plateau-south Asian monsoon region based on TRMM data[J]. *J Climate*, 27(17):6612-6626.
- Shen R J, Reiter E R, Bresch J F, 1986a. Some aspects of the effects of sensible heating on the development of summer weather systems over the Tibetan Plateau[J]. *J Atmos Sci*, 43(20):2241-2260.
- Shen R J, Reiter E R, Bresch J F, 1986b. Numerical simulation of the development of vortices over the Qinghai-Xizang (Tibet) Plateau[J]. *Meteor Atmos Phys*, 35(1-2):70-95.
- Shupe M D, Kollias P, Poellot M, et al, 2008. On deriving vertical air motions from cloud radar doppler spectra[J]. *J Atmos Oceanic Technol*, 25(4):547-557.
- Wang B, 1987. The development mechanism for Tibetan Plateau warm vortices[J]. *J Atmos Sci*, 44(20):2978-2994.
- 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.
- Wu G X, Zhang Y S, 1998. Tibetan plateau forcing and the timing of the monsoon onset over South Asia and the South China Sea [J]. *Mon Wea Rev*, 126(4):913-927.
- Xu X D, Lu C G, Shi X H, et al, 2008. World water tower: an atmospheric perspective[J]. *Geophys Res Lett*, 35(20):L20815.
- Yu S H, Gao W L, Xiao D X, et al, 2016. Observational facts regarding the joint activities of the southwest vortex and plateau vortex after its departure from the Tibetan Plateau[J]. *Adv Atmos Sci*, 33(1):34-46.