

何钰,陈小华,李耀孙,等,2021. 云南省副热带高压外围类短时强降水的雷达回波特征[J]. 气象,47(4):450-462. He Y, Chen X H, Li Y S, et al, 2021. Radar echo characteristics of short-time severe rainfall in the periphery of subtropical high in Yunnan Province[J]. Meteor Mon, 47(4):450-462(in Chinese).

云南省副热带高压外围类短时强降水的 雷达回波特征*

何钰¹ 陈小华¹ 李耀孙¹ 尹丽云² 李华宏¹

¹ 云南省气象台,昆明 650100

² 云南省人工影响天气中心,昆明 650100

提 要: 统计分析了 2014—2016 年 5—10 月国家站共出现的 219 站次有效短时强降水及云南省 7 部多普勒天气雷达资料,将云南省副热带高压(以下简称副高)外围的短时强降水进一步细分为两高(青藏高原和西太平洋副高)辐合类、单纯副高外围类及副高西侧配合西风槽类。初步得出以下结论:8 月为云南省副高外围类短时强降水的高发期且降水时段集中在午后及前半夜;两高辐合类降水沿着辐合区呈显著的带状分布特征,降水强度高、落区相对集中。单纯副高外围类降水主要位于滇南地区,存在三个强降水中心。副高西侧配合西风槽类降水主要位于云南省的边缘地区,落区较为分散;三类降水回波主体平均强度均在 35~45 dBz,平均持续 9 个体扫;近 1/4 的回波出现回波倾斜及强回波梯度特征,且降水明显强于未出现的回波,一定程度上可以作为判断降水强度的参考依据;三类降水的最强雷达回波顶高及垂直累积液态含水量出现的时间均同最强回波出现的时间基本一致或略有滞后;两高辐合类的垂直风廓线中有近一半的个例在低层存在西南风或西风气流,对应明显的暖平流输送特征。随着降水发展与副高外围晴空区相对应的无资料区的逐渐消失则是单纯副高外围类降水的垂直风廓线表现最为明显的特征。副高西侧配合西风槽类降水开始前后均存在高空西北气流入侵及中层风切变特征,与低槽后部带来的冷平流及冷暖气流交汇相对应。

关键词: 副热带高压外围,短时强降水,雷达回波特征

中图分类号: P457

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2021.04.006

Radar Echo Characteristics of Short-Time Severe Rainfall in the Periphery of Subtropical High in Yunnan Province

HE Yu¹ CHEN Xiaohua¹ LI Yaosun¹ YIN Liyun² LI Huahong¹

¹ Yunnan Meteorological Observatory, Kunming 650100

² Yunnan Weather Modification Centre, Kunming 650100

Abstract: Based on the data of effective short-time severe rainfall at 219 national stations and from 7 Doppler weather radars in Yunnan Province from May to October in 2014—2016, the short-time severe rainfall in the periphery of the subtropical high in Yunnan is further subdivided into three categories, including the Qinghai-Tibet high and western Pacific subtropical high convergence category, simple periphery of the subtropical high category and the west side of subtropical high with westerly trough category. The conclusions are as follows. August is the high incidence period of short-time severe rainfall in the periphery of the subtropical high in Yunnan Province, and the precipitation period is concentrated in the afternoon

* 中国气象局预报员专项(CMAYBY2017-069 和 CMAYBY2020-121)共同资助

2019 年 11 月 13 日收稿; 2020 年 11 月 28 日收修定稿

第一作者:何钰,主要从事天气预报和分析研究. E-mail:researchNL76@126.com

通讯作者:陈小华,主要从事短时临近天气预报和分析研究. E-mail:chenxh724@sina.com

and the first half of the night. The Qinghai-Tibet high and western Pacific subtropical high convergence precipitation distributes along the convergence area, with high intensity and relatively concentrated falling area. The simple periphery of the subtropical high precipitation is mainly located in southern Yunnan, manifested as three large-value zones. The west side of subtropical high with westerly trough precipitation is mainly located at the edge of Yunnan with scattered falling areas. The average intensity of the three types of precipitation echoes is between 35 dBz and 45 dBz with average duration of 9 volume scans. Nearly a quarter of the echoes have inclination and strong echo gradients, and the precipitation is obviously heavier than the echo which does not appear. In a way that can be used as a basis for judging the intensity of precipitation. The occurrence time of the strongest ET and VIL of the three types of precipitation is basically at the same time as that of the strongest echo, or slightly lagged behind. Nearly half of the Qinghai-Tibet high and western Pacific subtropical high convergence VWPs have southwesterly or westerly airflows in the lower layer, which corresponds to the obvious characteristics of warm advection. With the development of precipitation, the disappearance of no-data area corresponding to the clear sky area around the subtropical high is the most obvious feature of VWPs of precipitation in the simple periphery of the subtropical high. For the west side of subtropical high with westerly trough category, whether precipitation begins or not, invasion of upper northwest airflow and middle-level wind shear both exist, corresponding to the cold advection brought by the rear of the low trough and the intersection of warm and cold air currents.

Key words: periphery of subtropical high, short-time severe rainfall, radar echo characteristic

引言

西太平洋副热带高压(以下简称副高)是影响我国天气的重要系统之一,它的东西摆动及与周围各类天气尺度系统之间的相互作用是引发我国降水及各类强对流天气发生的重要原因(朱乾根等,2007)。由于副高自身的性质、强度及位置千变万化,使得副高边缘地带的天气变幻莫测,因此一直以来对副高边缘地区的天气预报都是一大难点。段旭等(2003)讨论了一例非汛期发生在滇西南的特殊暴雨过程,此次过程强降雨落区位于副高外围的西南气流中,通过滤波后发现在有利的大尺度环流背景下,中小尺度系统触发了对流的不稳定能量释放,进而造成了此次副高边缘的暴雨过程。张腾飞等(2005)讨论了一次发生在副高外围偏南气流及倒槽共同影响下的带状回波中尺度雨带的形成过程,指出副高外围的偏南气流为降水提供了充沛的水汽,同时回波及雨带平行于高空倒槽并偏向高压外围偏南暖气流一侧。周雨华等(2006)分析了湖南省4次典型的副高边缘暴雨天气过程,按照影响系统将其分为暖式切变线降水、冷式切变线降水和低槽降水三类,并分别讨论了各类的雷达回波及速度场特征;指出回波的形态、强度及移动方向与副高及低空急流的位置和移动密切相关;而径向速度图上表现出的低空急

流、逆风区、冷锋和高空的大风核等都是暴雨发生发展的典型回波特征。龙利民等(2007)讨论了在副高短暂的东西进退过程中,配合西北侧西风槽及暖湿气流所引发的一次强对流天气过程,并详细分析总结了其雷达回波及径向速度场特征。赵贤产等(2007)分析了副高脊线北侧一次局地冰雹天气的雷达回波特征,并得出了一些对冰雹天气具有重要指示意义的现象及特征。徐远波等(2009)分析了湖北省十堰市一次副高边缘的突发性大暴雨过程,指出副高的东西摆动为此次大暴雨过程提供了最关键的大气环流背景,且前期由副高及辐合区形成的高温高湿环境为此次过程积累了有效的不稳定能量,从而触发了 γ 中尺度系统,引发了局地大暴雨。崔粉娥等(2015)利用常规观测资料、再分析资料及T639模式预报产品研究了两次典型的副高边缘配合高空槽引发的大暴雨过程,指出可通过分析副高边缘的水汽通量辐合区、不稳定能量及垂直上升运动条件来判断是否存在中尺度对流系统的触发机制,从而判定大暴雨落区。支树林等(2015)利用常规观测资料、卫星、雷达及再分析资料,对发生在赣西的一次至灾性大暴雨过程进行了全面的分析,指出此次过程受副高边缘暖湿气流加强、高空槽及冷空气的共同影响,卫星上表现为 β 中尺度对流系统发展,雷达上则表现为中尺度涡旋及强偏南风,对应强辐合及水汽输送条件。李江波等(2019)统计分析了2000—2013年

共 69 个河北省副高外围类暴雨天气过程个例,按照副高形态特征将其分为 3 类,得出不同类型的环流场和物理量特征,并指出强降水位于 584 或 588 dagpm 线外围、低层 700 和 850 hPa 及地面系统附近。

短时强降水是 1 h 雨量达 20 mm 及以上或 3 h 雨量达 50 mm 及以上的降水(俞小鼎,2013),其发生时间短、降水效率高、致灾性强,同时还伴随其他强对流天气发生,利用卫星、雷达等高时空分辨率的资料对这一类强对流天气进行跟踪观测也是目前监测强对流天气的重要手段之一。李德俊等(2011)通过分析雷达产品中组合反射率因子强度、垂直累积液态含水量(VIL)、VIL 密度、垂直风廓线(VWP)等各因子的特征,总结出了适合湖北省恩施山区的强冰雹和短时强降水的临近预警指标。孙莹等(2011)利用雷达回波形态特征将桂林短时暴雨回波分为 6 类概念模型,并综合分析了各类型的天气形势背景、反射率因子、径向速度及各类导出产品的特征,建立了适合本地的暴雨雷达回波概念模型,为该地区进行短时暴雨临近预报提供参考。郝莹等(2012)分析了安徽省 16 年来典型的短时强降水个例,并根据影响天气系统及环流背景将其分为 3 类,同时通过雷达回波分析指出短时强降水对应有两种回波结构:低质心和高质心;速度场上表现出的中小尺度辐合、低空急流加强等也可以作为短时强降水预警的重要指标。

云南省的短时强降水是发生频率较高的一类强对流天气,由于其夜雨特征明显,加上云南多山地的复杂地形地貌,使得云南省的短时强降水局地性强、预报难度大。根据前期统计的结果,主汛期发生在云南省最多的便是副高外围类短时强降水(何钰等,2018)。近几年,对于云南省强对流天气的研究也不少。张崇莉等(2011)从雷达反射率因子、基本径向速度、VIL 及 VWP 等因子出发,对比分析了丽江地区冰雹及短时强降水雷达回波特征的异同点。马红等(2011)分析了滇东北三次副高边缘暴雨过程,指出其对流回波带均沿副高边缘呈 SW—NE 向,强降水位于回波带西南端;而径向速度场上表现出的逆风区、低空急流及中尺度辐合线等均对暴雨的落区预报具有重要指示意义。段鹤等(2011)对 2004—2009 年近 6 年发生在滇南地区(普洱和西双版纳)的强对流灾害性天气进行了统计,详细讨论了各类灾害性天气(冰雹、大风和短时强降水)对应的回波形态特征、中心强度、径向速度、风场及典型的物理

量场特征。段鹤等(2014)进一步统计了 2 年内发生在滇西南地区,小时雨量 ≥ 30 mm 的短时强降水过程共计 500 多次,根据其回波强度及辐合特征将其分为低质心弱辐合型、低质心辐合型和高质心短时强降水三类,并分别讨论了各自的回波形态及移动特征、径向速度场及风场演变特征,辐合切变量和 VIL 与降水强度的关系等。

目前应用雷达对副高外围这一单独短时强降水类别的研究还较少,因此本文主要基于前期统计工作基础,并参考云南省强降水的各类分型特征(许美玲等,2011;许宏波等,2016),利用 MICAPS 4.0 系统分析常规观测高空资料,同时利用雷达 PUP 软件及云南省人工影响天气中心开发的省市县三级一体化 3D 雷达分析显示软件,进一步将这一类发生频次高、预报难度大的短时强降水细分为:两高(青藏高原高压和西太平洋副高)辐合类、单纯副高外围类及副高西侧配合西风槽类,通过分析其时空分布特征,并分类总结其对应的基本反射率因子、基本径向速度、回波顶高(ET)、VIL 和 VWP 等特征,进一步总结在某一类特定的天气环流形势背景下,对短时强降水的临近预报具有较好指示意义的一套具有时间尺度小、空间分辨率高、实用性强的高分辨率资料配置方案,提高云南省短时强降水的预报预警准确率。

1 资料

由于欠缺 2012—2013 年云南省雷达基数据资料,为了与雷达分析所用样本一致,本研究根据前期定义的全省性短时强降水过程选取标准(何钰等,2018),统计了 2014—2016 年云南省 62 个副高外围类短时强降水过程个例,其中单纯副高外围类为 24 个,两高辐合类为 23 个,副高西侧配合西风槽类为 15 个。同时提取了低于第 99% 分位短时强降水为 219 站次,其中两高辐合类短时强降水为 89 站次,是云南省副高外围类短时强降水最多的类别。副高西侧配合西风槽类及单纯副高外围类短时强降水均为 65 站次。

2 云南省各类短时强降水的时空分布特征

2.1 时间分布特征

根据前期统计结果,可知 7 月和 8 月准正压类

短时强降水发生频次较高,且集中出现在 16—18 时及 02—05 时(何钰等,2018)。从图 1a 统计也可看出,三类短时强降水发生频次最多的月份均在 8 月,统计时段内 5 月和 10 月副高外围类短时强降水发生的概率极低。同时,从图 1b 可以看出,10—12 时几乎没有副高外围类短时强降水的发生,其发生时段仍然集中在午后及前半夜。这与陈炯等(2013)统计的中国暖季短时强降水的时空分布特征基本一致。

2.2 空间分布特征

提取各类短时强降水个例发生时段内对应的高度场资料,统计平均后得到每一类短时强降水的平均高度场分布特征;同时对各类短时强降水各站点雨量进行累加,得到云南省副高外围类短时强降水的空间分布特征。

从图 2a 可以看出两高辐合类短时强降水对应的两个高压系统分别位于西藏东部到缅甸中北部以及长江中下游到华南地区,分别称为青藏高压和西太平洋副高。短时强降水沿着两高辐合区,呈西北—东南向带状分布特征,且降水强度强、覆盖范围广。其中 ≥ 50 mm 的降水大值区分别位于丽江东部、楚雄中部、昆明、玉溪东部、曲靖、文山北部、红河南部及西双版纳南部地区,对应的国家站为:华坪、永胜(丽江)、禄丰(楚雄)、昆明、太华山、寻甸、宜良(昆明)、澄江(玉溪)、罗平(曲靖)、西畴、丘北(文山)、金平、红河、建水(红河)及勐腊(西双版纳)。

从图 2b 可以看出单纯副高外围类短时强降水对应的副高 587 dagpm 线的脊线位于 $26^{\circ}\sim 28^{\circ}$ N,

西伸脊点位于 98° E 附近。从降水分布来看,受副高控制的滇中及以北大部地区降水稀少,站点累积降水量基本小于 35 mm;短时强降水则集中出现在受副高外围影响的滇西南及滇南地区,累积降水量 ≥ 35 mm,且存在三个明显的大值区:德宏东部—保山西部—临沧北部、普洱东部—红河西部—文山东部边缘。对应的累积降水量 ≥ 50 mm 的国家站站点为:芒市(德宏)、龙陵(保山)、绿春、金平、屏边(红河)、江城、墨江、思茅(普洱)和富宁(文山)。曲靖、昆明东部、红河北部及大理地区几乎没有此类短时强降水发生。

副高西侧配合西风槽类短时强降水的落区由于每个个例的西风槽及副高的相对位置不同,导致累积降水分布不均匀:当西风槽及副高之间的辐合区偏西偏北时,降水主要位于滇西北地区;当两者之间的辐合区偏南时,则降水主要位于滇南地区。即短时强降水落区与西风槽前及副高 587 dagpm 线之间的辐合区相对应。从图 2c 可以看出此类短时强降水的副高 587 dagpm 线平均位于滇东南的文山地区,同时西风槽线的平均位置从陕西南部到四川中东部再延伸至云南省的丽江南部、大理北部及怒江南部一带,因此降水主要分布在滇中及以东以南地区。其中强降水主要位于受西风槽前抬升、副高外围热力作用及地形强迫共同影响的云南省边缘地区,因此降水落区较前两类呈现出比较分散的特征。对应的累积降水量 ≥ 50 mm 的国家站站点为:丽江、绥江(昭通)、沾益、曲靖、富源(曲靖)、河口、江城(红河)、景谷(西双版纳)、龙陵(保山)及楚雄。

综上所述,两高辐合类降水沿着辐合区发展,呈

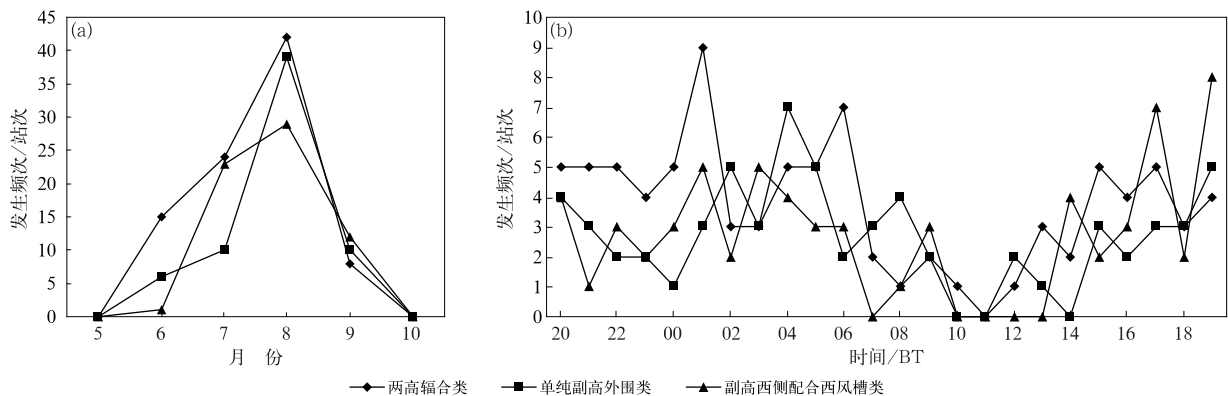


图 1 2014—2016 年 5—10 月云南省各类型短时强降水的逐月(a)及逐时(b)分布特征
 Fig. 1 Monthly (a) and hourly (b) distributions of various types of short-time severe rainfall in Yunnan Province from May to October in 2014–2016

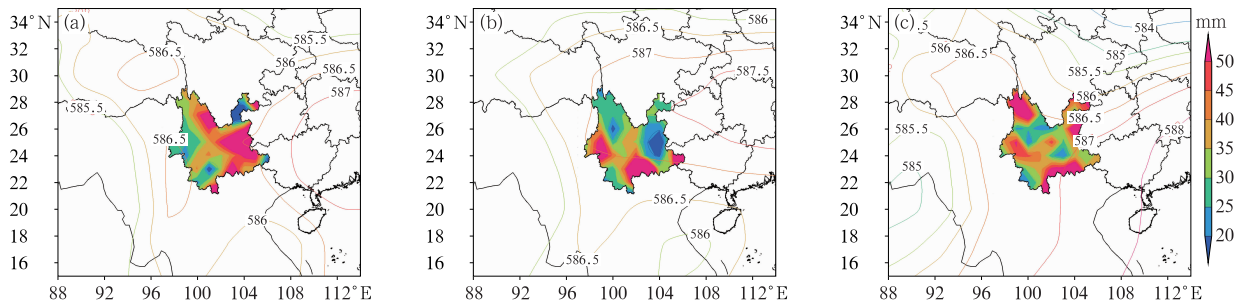


图 2 2014—2016 年云南省各类型短时强降水平均高度场(实线,单位:dagpm)及累积降水(填色)分布特征

(a)两高辐合类,(b)单纯副高外围类,(c)副高西侧配合西风槽类

Fig. 2 Mean height field (solid line, unit: dagpm) and cumulative precipitation (colored) distribution characteristics of various types of short-time severe rainfall in Yunnan Province during 2014—2016

(a) Qinghai-Tibet high and western Pacific subtropical high convergence category, (b) simple peripheral of subtropical high category, (c) west side of subtropical high with westerly trough category

现带状分布特征,且降水强度高、覆盖范围广;单纯副高外围类的短时强降水沿着副高 587 dagpm 线外围分布,位于滇南地区,并存在三个明显的大值区;副高西侧配合西风槽类短时强降水落区与西风槽前及副高 587 dagpm 线之间的辐合区相对应。其中强降水主要位于受西风槽前抬升、副高外围热力作用及地形强迫共同影响的云南省的边缘地区。上述分析结论对于预报员判断一定天气形势下短时强降水的分布及强降雨落区具有很好的指导意义。

3 云南省各类短时强降水的雷达回波特征

由于临沧及曲靖雷达于 2016 年才投入业务应用,所以本研究只基于云南省原有的 7 部 CIN-CC 天气雷达基数据,并除去缺少雷达基数据及位于雷达探测边缘的短时强降水站点,本节用于雷达分析的有效站点共计 156 站次,其中两高辐合类短时强降水为 64 站次,单纯副高外围类为 54 站次,副高西侧配合西风槽类为 38 站次。下文对这 156 站次国家站短时强降水发生时段内的雷达回波特征做统计分析,分别得出各类型短时强降水的雷达回波特征。

3.1 回波形态特征

将降水过程中回波主体反射率因子值 < 35 dBz 的回波称为层云降水回波;将 $35 \text{ dBz} \leq$ 回波主体反射率因子值 < 45 dBz 的回波称为层积混合云降水

回波;将回波主体反射率因子值 ≥ 45 dBz 的回波称为积云降水回波。据统计,各类短时强降水回波均以层积混合云为主,这与段鹤等(2011)统计的滇南地区短时强降水主要为层积混合云相一致。从云状及出现次数来看,各类中出现最多的均为块状回波,三类所占比例分别为 42%、60%及 56%;絮状回波次之。说明云南省副高外围类短时强降水发生的局地性较强,回波以分散的块状分布为主,预报难度加大,这与何钰等(2018)统计得出的结论相一致。从云型加云状所对应的平均小时降水量对比分析来看(表略):絮状的层积混合云、带状的层积混合云(积云)所带来的短时强降水平均小时降水量最大,为 30~40 mm;其次是絮状的积云、块状的层积混合云(积云)带来的短时强降水,平均小时降水量为 25~30 mm;层云平均小时降水量则为 20~30 mm。说明絮状及带状的层积混合云或积云由于强度高、覆盖范围广且持续时间长使得小时降水量大。

从过程时段内伴随的其他强对流天气来看,两高辐合类出现 1 例冰雹天气和 2 例大风天气;单纯副高外围类出现 1 例冰雹天气和 10 例大风天气;副高西侧配合西风槽类出现 3 例大风天气。雷暴出现的范围除了单纯副高外围类大于短时强降水落区外其余两类都与降水落区基本一致,与降水系统有显著的对应关系。可知单纯副高外围类短时强降水伴随的其他强对流天气多且强度高,落区预报难度大,致灾性更严重。

表 1 2014—2016 年云南省各类短时强降水的回波形态特征及统计时段内伴随的其他强对流天气
Table 1 Echo morphological characteristics of various types of short-time severe rainfall and other severe convective weather in statistical period in Yunnan Province during 2014—2016

类型	云型	云状	统计时段内伴随的其他强对流天气
两高辐合类	层云 11 块	块状 27 块	冰雹:2015 年 7 月 31 日 13:16,曲靖(冰雹最大直径为 3 cm)
	积云 8 块	絮状 27 块	大风:2014 年 7 月 29 日 17:11,丽江华坪(西南偏西风,17.4 m·s ⁻¹)
	层积混合云 45 块	带状 10 块	2015 年 8 月 1 日 18:15,楚雄双柏(北风,17.8 m·s ⁻¹)
单纯副高外围类	层云 13 块 积云 7 块 层积混合云 34 块	块状 33 块 絮状 11 块 带状 10 块	冰雹:2016 年 8 月 26 日 16:37,玉溪江川(冰雹最大直径为 8 cm)
			大风:2014 年 8 月 4 日 20:07,楚雄永仁(西风,18.2 m·s ⁻¹)
			2016 年 7 月 30 日 17:46,昭通绥江(南风,18 m·s ⁻¹)
			2016 年 8 月 12 日 16:40,玉溪易门(北风,22.7 m·s ⁻¹)
			2016 年 8 月 22 日 03:08,楚雄牟定(东北风,22.1 m·s ⁻¹)
			2016 年 8 月 22 日 16:40,昆明呈贡(东北风,24.7 m·s ⁻¹)
			2016 年 8 月 22 日 17:17,昆明安宁(东风,18.6 m·s ⁻¹)
			2016 年 8 月 22 日 19:10,楚雄楚雄(东风,17.3 m·s ⁻¹)
			2016 年 8 月 22 日 19:30,楚雄元谋(东风,19.7 m·s ⁻¹)
			2016 年 8 月 26 日 15:46,玉溪通海(南风,17 m·s ⁻¹)
2016 年 8 月 26 日 17:40,玉溪易门(东北风,18.7 m·s ⁻¹)			
副高西侧配合西风槽类	层云 9 块 积云 7 块 层积混合云 22 块	块状 21 块 絮状 11 块 带状 6 块	大风:2014 年 9 月 6 日 15:14,昆明富民(西风,17.1 m·s ⁻¹)
			2015 年 8 月 12 日 00:39,曲靖马龙(西北风,18.1 m·s ⁻¹)
			2015 年 8 月 12 日 16:43,楚雄姚安(西南风,21.4 m·s ⁻¹)

3.2 反射率因子、径向速度及其垂直剖面特征

从回波强度及持续时间的统计来看(表略),两高辐合类、单纯副高外围类和副高西侧配合西风槽类短时强降水的回波主体平均强度均在 35~45 dBz,平均持续 9 个体扫,约为 54 min。最强回波强度平均为 50 dBz,持续 2 个体扫。相应平均质心高度分别为:7.9、4.8 和 3.9 km。一定程度上说明了两高辐合类由于辐合区稳定少动,对流发展旺盛,使得回波整体伸展高度较高,云体较厚,降水持续时间长且强度强;而副高西侧配合西风槽类云体发展高度较低,说明随着低槽及副高的东移或摆动,回波还来不及向上发展到较高的高度便随着系统移动。单纯副高外围类短时强降水的质心高度则介于两者之间。同时,如果将 ≥ 50 dBz 回波的平均高度与 0 °C 层高度相比,高于 0 °C 层的为高质心,低于 0 °C 层的为低质心(段鹤等,2014),则统计得出大部分个例为低质心短时强降水,只有少数为高质心短时强降水。从统计结果来看,短时强降水的平均中心强度及质心高度远远低于冰雹云回波(段鹤等,2011),也可以据此将两类回波区分开来。

从三类短时强降水的反射率因子垂直剖面来看(表 2),有近 25% 的个例表现出了回波倾斜及强回波梯度区的特征,非常有利于降水回波的持续及发展(俞小鼎,2013)。这些回波对应的降水强度平均

位于 28~30 mm·h⁻¹ 的降水区间,相较于未出现这些特征的回波降水强度(平均位于 26~28 mm·h⁻¹)要强,其中单纯副高外围类出现了 2 例回波悬垂,对应的短时强降水量级均 > 26 mm·h⁻¹。从速度剖面特征来看,两高辐合类及副高西侧配合西风槽类表现出明显的中层辐合及风暴顶辐散特征,与中低层系统之间的辐合作用有紧密关系。单纯副高外围类出现最多的为高空大风及低层存在前侧入流急流,与其伴随最多的大风天气个例统计特征相对应。

从雷达基本径向速度场上的大尺度连续风场来看,两高辐合类以偏南风及西北风为主,对应两个高压外围两股气流的辐合;单纯副高外围类以东南风及东风气流为主,与副高南侧的东风气流相对应;副高西侧配合西风槽类以西南风为主,对应槽前及副高西侧的西南风气流。平均风速均为 4 m·s⁻¹,统计平均最大风速,单纯副高外围类达 11 m·s⁻¹;其次是副高西侧配合西风槽类,为 9 m·s⁻¹;最小为两高辐合类,为 6 m·s⁻¹。在中小尺度风场上,三类短时强降水均表现出明显的低层辐合特征,同时两高辐合类出现气旋性辐合 14 例,单纯副高外围类出现 9 例,副高西侧配合西风槽类出现 4 例。通过对降水时段内径向速度的演变特征统计可知,低层最强辐合及高层辐散出现的时间与强回波出现的时间几乎一致(图略),即当低层辐合且高层对应的辐

散加强或低层出现气旋性辐合时,回波也相应达到最强,而强回波的出现也预示着强降水的发展或降水的持续。因此雷达径向速度场上表现出来的这种辐合辐散特征对于临近时段内降水的发展演变具有较好的指示意义(王彦等,2008)。

总的来说,三类短时强降水的回波主体平均强度在 35~45 dBz,回波持续时间长。质心平均高度以两高辐合类发展最高,同时近 90% 的个例为低质心短时强降水。雷达基本径向速度场上表现出的大尺度连续风场走向与系统相对应,中小尺度风场表

现出低层辐合的特征,部分个例出现气旋性辐合。从剖面特征来看,近 1/4 的短时强降水回波出现了回波倾斜及强回波梯度区特征,且出现这些特征的回波对应的降水强度要明显强于未出现的回波,一定程度上可以作为判断短时强降水强度的参考依据。速度剖面图上,两高辐合类及副高西侧配合西风槽类均表现出明显的中层辐合及风暴顶辐散特征,与低层系统相互作用相关联。而单纯副高外围类表现为高空存在大风及低层存在前侧入流急流,与其伴随最多的大风天气个例的统计特征相对应。

表 2 2014—2016 年云南省各类短时强降水的垂直剖面特征(括号内数字为出现次数)

Table 2 The vertical profile characteristics of various types of short-time severe rainfall in Yunnan Province during 2014—2016 (number of occurrences)

类型	回波剖面	质心高度	大尺度连续风场	中小尺度风场	速度剖面
两高辐合类	回波倾斜(15) 强回波梯度(9)	低质心(59) 高质心(5)	西南风 西北风	气旋性辐合(14 例) 低层辐合、高层辐散	MARC(14) 风暴顶辐散(10) RIJ(6) 垂直风切变(6) 0.5°大风区(5) 高空大风(5) 前侧入流急流(5) 中层大风(3)
单纯副高外围类	回波倾斜(10) 强回波梯度(7) 回波悬垂(2)	低质心(50) 高质心(4)	东南风 东风	气旋性辐合(9 例) 低层辐合、高层辐散	高空大风(17) 前侧入流急流(9) 垂直风切变(7) MARC(6) 0.5°大风区(5) 中层大风(5) 风暴顶辐散(2)
副高西侧配合西风槽类	回波倾斜(9) 强回波梯度(1)	低质心(32) 高质心(6)	西南风	气旋性辐合(4 例) 低层辐合、高层辐散	风暴顶辐散(7) MARC(6) 中层大风(3) 前侧入流急流(3) 0.5°大风区(1) 垂直风切变(1) 高空大风(1)

3.3 ET、VIL 及 VWP 特征

选取与短时强降水强度关系紧密的三个物理量进行分析(刘淑媛等,2003;应冬梅等,2007;段鹤等,2011;李华宏等,2012),从统计结果来看(表 3),各类短时强降水最强回波顶高平均为 12~13 km,其出现的时间与最强回波出现的时间相比超前的较少,基本一致及滞后的个例占多数;从 VIL 来看,最强 VIL 的平均值从小到大依次为:两高辐合类($5.8 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$)、单纯副高外围类($7.4 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$)、副高西侧配合西风槽类($8.5 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$),同时最强 VIL 出

现的时间与最强回波出现的时间基本一致。由于强回波的出现一般预示着强降水的开始,因此 ET 和 VIL 大值的出现一定程度上可以作为判断强降水是否开始的参考依据。

从 VWP 的统计特征来看,两高辐合类短时强降水的中低层风场基本存在风向随高度顺转或整层风向较一致的特征;同时有近 1/3 的个例低层存在西南风或西风急流,说明低层暖湿平流为降水区提供了大量的能量和水汽条件;中高层 2~5 km 存在风切变特征,风向转变几乎达 180° ,对应两高之间偏南风与偏北风辐合的风场特征。部分个例降水前

存在西南气流增厚或高空急流下传的现象,与这类特征对应的短时强降水强度往往大于 $35 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$;单纯副高外围类短时强降水则表现为整层风向一致或低层受副高外围东南风控制,高层转为偏东风的逆转特征。降水开始后与副高外围晴空区相对应的无资料区逐渐消失也是这一类 VWP 表现较明显的特征。ND 的逐渐减少,一定程度上也对应着

降水的逐步发展,这与副高外围的水汽条件增强也密切相关。副高西侧配合西风槽类短时强降水的 VWP 表现为中低层或整层风向随高度顺转的特征(低层东南风转高层槽前偏西风),降水开始前后存在高空西北气流入侵及中层风切变的特征,与低槽后部带来的冷平流相对应。

表 3 2014—2016 年云南省各类短时强降水的 ET、VIL 及 VWP 特征

Table 3 The ET, VIL and VWP characteristics of various types of short-time severe rainfall in Yunnan Province during 2014—2016

	ET		VIL		半径 30 km 内 VWP 特征 (括号内数字为出现次数)
	最强平均值/km	最强 ET 与最强回波 出现时间相比/次	最大平均值 ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$)	最大 VIL 与最强回波 出现时间相比/次	
两高辐合类	12	超前 4, 一致 35, 滞后 25	5.8	超前 2, 一致 55, 滞后 7	中低层风向顺转(17);整层风向较一致型(15);低层西南风、南风急流(14);风切变(11);降水前西南气流增厚(5);降水后气流增强(3);急流下传(3);中低层风向逆转(3);降水后无资料区消失(1)
单纯副高外围类	13	超前 12, 一致 24, 滞后 18	7.4	超前 5, 一致 46, 滞后 3	低层东风、东南风(21);整层风向较一致型(12);降水后无资料区消失(9);中低层风向逆转(8);中低层风向顺转(4);风切变(3);降水后气流增强(2);急流下传(1)
副高西侧配合 西风槽类	13	超前 3, 一致 19, 滞后 16	8.5	超前 1, 一致 35, 滞后 2	中低层或整层风向顺转(11);降水开始前后高空西北气流入侵(6);风向辐合切变(5);整层风向较一致型(3);中低层风向逆转(2);降水开始后(ND);逐渐消失(1)

4 云南省各类短时强降水典型个例分析

4.1 两高辐合类

2015 年 7 月 31 日 20 时至 8 月 1 日 20 时受两高辐合的影响,云南省国家站累计出现 13 站次的短时强降水,区域站累计出现了 230 站次短时强降水,最大短时强降水量为 64.4 mm (红河河口太阳寨站),过程期间楚雄双柏出现了 $17.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的偏北大风,同时伴随有明显的雷暴天气。从图 3a 可以看出:8 月 1 日 08 时两个高压中心分别位于四川西北部及日本南部,滇中及以东以南为两高辐合区,辐合低涡中心位于红河东南部,短时强降水集中出现在低涡及倒槽辐合区附近(黄色阴影标注为短时强降水集中出现区域,下同)。下文以丽江永胜、昆明太华山及红河河口三家寨 3 个站为代表,分别从回波

发展最强时刻的 3D 形态特征、反射率因子及径向速度垂直剖面(剖面均以雷达中心开始并经过最强回波,下同)和典型的 VWP 特征来讨论雷达回波形态特征与此类短时强降水强度的对应关系。

从图 3b 可以看出(立体显示部分为回波强度 $\geq 45 \text{ dBz}$ 的回波,下同):过程时段内,永胜为块状层云降水回波,太华山为絮状层积混合云降水回波,河口三家寨为块状积云降水回波。三地回波主体强度及持续时间分别为:30~35 dBz/8 个体扫、40~45 dBz/5 个体扫及 45~50 dBz/3 个体扫。过程时段内回波对应的降水强度分别为 31.2 、 46.3 及 $52.4 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 。从反射率因子及径向速度垂直剖面来看(图 3c):永胜站 35 dBz 的底高为 5.1 km ,ET 最高达到 8.2 km ,径向速度垂直剖面表现出一定的中低层辐合及高层辐散的特征,加上回波持续时间长,因此虽然是层云降水,但降水强度 $> 30 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$,降水较强;太华山地区 35 dBz 的底高基本维持在 2.6 km 且顶高最高达 8.9 km ,根据近年来对昆明

强降水的统计分析,当强回波出现在低层时均能出现强降水天气。此次降水反射率因子剖面表现为显著的回波倾斜,同时在速度图上出现低层辐合及中高空急流的特征,中低层垂直风切变明显,非常有利于降水的发展;河口三家寨站出现 35 dBz 的高度达到 8.6 km,强回波中心也出现在低层,径向速度垂直剖面图上则表现为中低层辐合及高层辐散交替出现的特征,高层伴随急流出现,更加有利于回波的维持及发展,加上河口地区特殊的喇叭口地形,使得水汽更容易汇聚(过程时段内河口三家寨站的 VIL 达 $11 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$,远大于其余两个站的 VIL),因此小时降水强度更强。从太华山的水平风垂直廓线演变来看,过程时段内,从底层到高层表现为一致的风随高度顺转,整体风速为 $4 \sim 8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,垂直风切变约为 $2 \sim 4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ 。与前期统计的两高辐合类的风廓线特征一致。

4.2 单纯副高外围类

2016 年 8 月 26 日 20 时至 27 日 20 时受副高外围的影响,云南省国家站累计出现 4 站次的短时强降水,区域站累计出现了 136 站次短时强降水,最大短时强降水量为 72.8 mm(普洱江城洛捷村站),过程前受副高南侧强偏东风影响,滇中的玉溪出现了大风及冰雹天气,同时过程时段内副高南侧伴随有明显雷暴天气。从图 4a 中可以看出此次过程副高强大,高压中心位于四川西北部,强度达 594 dagpm。全省几乎位于 590 dagpm 线控制范围内。其中 590 dagpm 线稳定位于滇西南地区,短时强降水集中出现在丽江东部、德宏、保山、临沧、普洱、西双版纳、玉溪西部、红河南部及昆明南部。下文以德宏芒市、西双版纳勐海及景洪 3 个站为代表,分析此类短时强降水的雷达回波特征。

从图 4b 可以看出,芒市为絮状层积混合云降水,勐海及景洪均为同一条带状回波中的层积混合云降水。三地回波主体强度及持续时间分别为: $35 \sim 40 \text{ dBz}/7$ 个体扫、 $30 \sim 40 \text{ dBz}/5$ 个体扫及 $35 \sim 40 \text{ dBz}/5$ 个体扫。过程时段内回波对应的降水强度分别为 52.5 、 21.5 及 $24.6 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 。从反射率因子及径向速度垂直剖面来看(图 4c):芒市回波发展高度较高,ET 最高达 14.2 km,最强时段 $\geq 50 \text{ dBz}$ 的回波伸展至 7 km 左右,径向速度垂直剖面图上则表现出明显的 0.5° 低层大风区,径向风速达 $17.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。存在中低层辐合及高层辐散特征。

勐海和景洪则分别位于带状回波的尾部和中部,由于回波整体移动方向与发展方向垂直,降水持续时间短,强度较弱。回波伸展高度较低,位于 4 km 左右,径向速度图上勐海只存在底层弱辐合,景洪回波顶还配合有弱辐散,因此雨量稍强于勐海。从芒市的水平风垂直廓线演变来看,过程时段内,从底层至高层风向逐渐逆转,2.1~2.7 km 为东南风,2.7 km 以上为偏东风,整体风速为 $4 \sim 8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,垂直风切变约为 $2 \sim 6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ 。自 06:08 降水开始后 ND 逐渐消失,对应前期受副高控制的晴空区随着降水发展而逐渐消失。

4.3 副高西侧配合西风槽类

2015 年 8 月 12 日 20 时至 13 日 20 时受副高西侧西风槽东移的影响,云南省国家站累计出现 9 站次的短时强降水,区域站累计出现 116 站次短时强降水,最大短时强降水量为 63.5 mm(文山市丘北县布红站),过程发生时段内受西风槽过境后强西北气流的影响,玉溪江川及红河泸西先后出现了大风天气,同时过程时段内全省几乎都伴随有明显雷暴天气。从图 5a 中可以看出此次过程西风槽强并不断东移南压,13 日 08 时西风槽将副高切断为两个高压,高压中心分别位于西藏东南部及西太平洋地区。短时强降水位于西风槽前及副高外围共同影响的区域,覆盖范围较广。下文以丽江、普洱景谷及昆明宜良 3 个站为代表,分析此类短时强降水的雷达回波特征。

从图 5b 可以看出,宜良为块状积云降水,丽江及景谷均为带状层积混合云降水,但丽江带状回波组织紧密,强度强,景谷则属于镶嵌在带状层云降水回波中的积云单体。丽江、景谷及宜良回波主体强度及持续时间分别为: $45 \sim 55 \text{ dBz}/3$ 个体扫、 $35 \sim 45 \text{ dBz}/7$ 个体扫及 $40 \sim 50 \text{ dBz}/7$ 个体扫。过程时段内回波对应的降水强度分别为 44 、 27.3 及 $28.4 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 。从反射率因子及径向速度垂直剖面来看(图 5c):丽江回波发展高度最高,35 dBz 的 ET 最高达 11.5 km,且最强时段质心高度达 5 km 左右,回波存在倾斜特征。径向速度垂直剖面图上表现出明显的 0.5° 低层大风区及 MARC 特征,辐合强度强,正负速度核均大于 $14 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,虽然强回波持续时间不长,但降水效率高,强度强。景谷和宜良回波也存在倾斜特征,但由于回波块单一,组织性不强,因此降水弱于具有较高组织性的丽江带状回波。

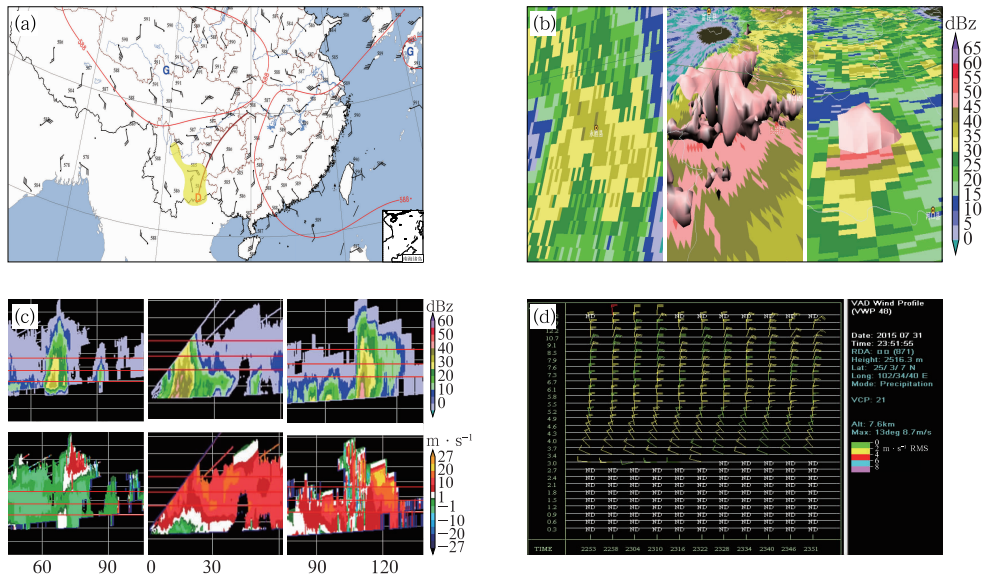


图 3 2015 年(a)8 月 1 日 08 时 500 hPa 高度场(单位:dagpm), (b)7 月 31 日永胜(23:28)、太华山(23:05)及河口三家寨(21:32)3D 回波, (c)对应于上述 3 个站的反射率因子及径向速度垂直剖面 and (d)太华山(23:51)VWP 特征
 Fig. 3 The 500 hPa height field (unit: dagpm) at 08:00 BT 1 August (a), 3-D echoes at the strongest moment in Yongsheng (23:28 BT), Taihuashan (21:32 BT) and Hekou (23:05 BT) on 31 July (b), and the vertical profiles of reflectivity factor and radial velocity at three stations in Fig. 3b (c), the VWP characteristic of Taihuashan at 23:51 BT 31 July (d) 2015

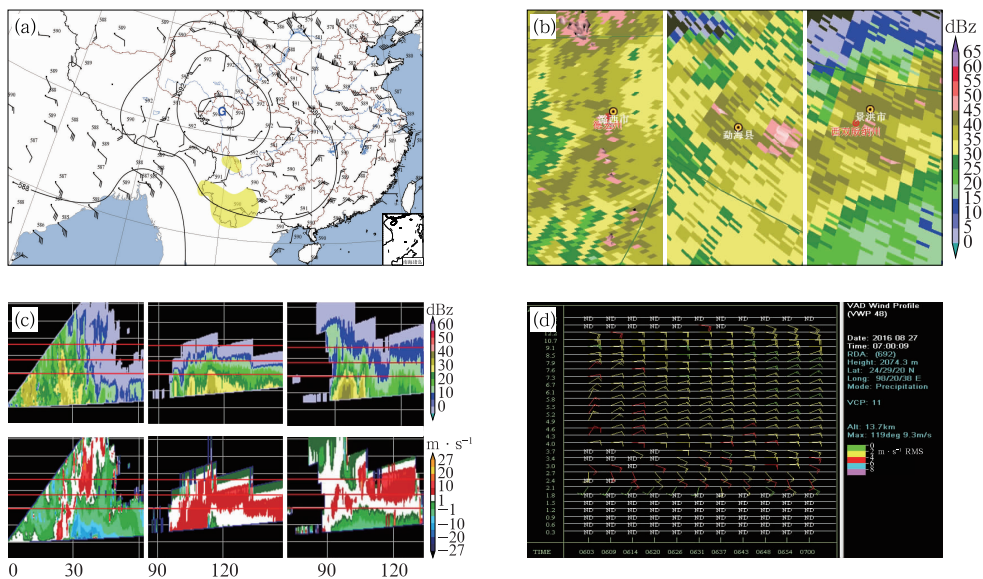


图 4 2016 年 8 月 27 日(a)08 时 500 hPa 高度场(单位:dagpm), (b)芒市(06:08)、勐海(11:41)及景洪(11:52)3D 回波, (c)对应于上述 3 个站的反射率因子及径向速度垂直剖面 and (d)芒市(07:00)VWP 特征
 Fig. 4 The 500 hPa height field (unit: dagpm) at 08:00 BT 27 August (a), 3-D echoes at the strongest moment in Mangshi (06:08 BT), Menghai (11:41 BT) and Jinghong (11:52 BT) on 27 August (b), and the vertical profiles of reflectivity factor and radial velocity at three stations in Fig. 4b (c), the VWP characteristic of Mangshi at 07:00 BT 27 August (d) 2016

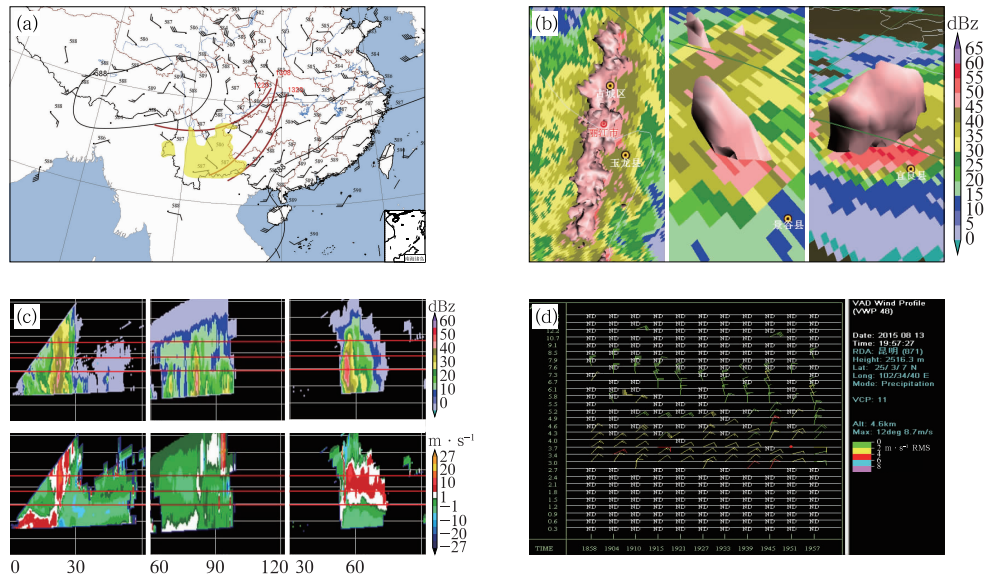


图 5 2015 年 8 月 (a) 13 日 08 时 500 hPa 高度场 (单位: dagpm) 及 12 日 20 时至 13 日 20 时西风槽位置, (b) 丽江 (12 日 22:11)、景谷 (13 日 02:38) 及宜良 (13 日 19:09) 最强时刻 3D 回波, (c) 对应上述 3 个站的反射率因子及径向速度剖面 and (d) 宜良 (13 日 19:57) VWP 特征

Fig. 5 The 500 hPa height field (unit: dagpm) at 08:00 BT 13 August, and the location of westly trough from 20:00 BT 12 to 20:00 BT 13 August (a), 3-D echoes at the strongest moment in Lijiang (22:11 BT 12), Jinggu (02:38 BT 13) and Yiliang (19:09 BT 13) August (b), and the vertical profile of reflectivity factor and radial velocity at three stations in Fig. 5b (c), the VWP characteristic of Yiliang at 19:57 BT 13 August (d) 2015

径向速度图上表现出一定的高层辐散,但并无明显的中低层辐合特征。从宜良的水平风垂直廓线演变来看,过程时段内,表现最明显的特征为高空偏北气流的逐渐入侵,随着降水发展,4.0~7.3 km 的无资料区逐渐消失,偏北气流过后 5.8~7.9 km 的高空又表现为无资料的晴空区。

5 结论与讨论

本文将 2014—2016 年 5—10 月云南省全省性副高外围类短时强降水过程进一步分为两高辐合类、单纯副高外围类及副高西侧配合西风槽类,并利用 MICAPS 4.0 显示系统及雷达分析软件,从降水落区与系统分布、云状云型、反射率因子及径向速度垂直剖面特征,以及相关物理量等方面对云南省 7 部多普勒天气雷达的基数据进行分析,初步得出了以下结论:

(1) 8 月为副高外围类短时强降水的高发期,5 月和 10 月发生此类短时强降水的概率较低;短时强降水发生时段集中在午后到前半夜,10—12 时几乎

没有此类短时强降水的发生。

(2) 单纯副高外围类短时强降水主要沿着副高 587 dagpm 线外围分布,位于滇南地区,并存在 3 个降水大值区;两高辐合类的降水沿着辐合区呈西北—东南向的带状分布特征,且短时强降水强度高、范围广;副高西侧配合西风槽类短时强降水落区范围大,降水主要位于槽前及副高 587 dagpm 线之间,降水大值区分布在云南省的边缘地区。

(3) 各类短时强降水均以层积混合云降水为主;从云状统计来看,各类中出现最多的均为块状回波,表明此类短时强降水局地性强,降水落区相对分散,预报难度大。从云型加云状所对应的平均降水量对比分析来看,絮状及带状的层积混合云或积云由于强度高、覆盖范围广且持续时间长使得小时降水量大。

(4) 三类短时强降水的回波主体平均强度 35~45 dBz,平均持续 9 个体扫。近 90% 的个例为低质心短时强降水。雷达基本径向速度场上的大尺度连续风场走向与影响系统相对应,中小尺度风场表现为明显的低层辐合特征,部分个例出现气旋性辐合。

(5)从回波的垂直剖面特征来看,近1/4的短时强降水回波出现了回波倾斜及强回波梯度区的特征,且降水强度要明显强于未出现的回波,一定程度上可以作为判断短时强降水强度的参考依据。速度剖面图上,两高辐合类及副高西侧配合西风槽类均表现出明显的中低层辐合及风暴顶辐散特征,与低层系统相互作用相对应。单纯副高外围类表现为高空存在大风及低层存在前侧入流急流,与其伴随有最多的大风天气个例统计特征相对应。

(6)各类短时强降水的最强ET及最强VIL出现的时间同最强回波出现的时间基本一致或略有滞后;因此ET和VIL大值的出现一定程度上可以作为判断强降水是否开始的参考依据。从VWP的统计特征来看,各类均能反映出与影响系统及降水演变相关的明显特征,对于判断短时强降水类别进而分析总结降水落区及强度有很好的补充作用。

由于本文只讨论了副高外围这一类短时强降水的雷达回波特征,而根据前期统计结果,还有其余四类发生在云南省的短时强降水类型,因此对于它们的雷达回波特征分析及其与本文中所讨论的副高外围类短时强降水之间的异同点还有待进一步探索研究。随着数值预报的精细化及准确率的不断提高,将高分辨率的卫星及雷达实况资料同化到模式中去,进而得到快速更新循环的模式分析及预报资料已经成为了目前提高短时临近预报能力的主要手段及必要的发展趋势(陈明轩等,2004;郑永光等,2010;李华宏等,2014;薛湛彬等,2017;刘静等,2019),因此这方面的研究有待进一步深入。

参考文献

陈炯,郑永光,张小玲,等,2013.中国暖季短时强降水分布和日变化特征及其与中尺度对流系统日变化关系分析[J].气象学报,71(3):367-382. Chen J, Zheng Y G, Zhang X L, et al, 2013. Analysis of the climatological distribution and diurnal variations of the short-duration heavy rain and its relation with diurnal variations of the MCSs over China during the warm season[J]. Acta Meteor Sin, 71(3):367-382(in Chinese).

陈明轩,俞小鼎,谭晓光,等,2004.对流天气临近预报技术的发展与研究进展[J].应用气象学报,15(6):754-766. Chen M X, Yu X D, Tan X G, et al, 2004. A brief review on the development of nowcasting for convective storms[J]. J Appl Meteor Sci, 15(6):754-766(in Chinese).

崔粉娥,李飏,畅巨峥,等,2015.两次副热带高压外围沿海暴雨过程对比分析[J].气象科技进展,5(6):42-47. Cui F E, Li Y, Chang J Z, et al, 2015. Comparison analysis of the two coastal

rainstorm courses of subtropical high peripheral precipitation[J]. Adv Meteor Sci Technol, 5(6):42-47(in Chinese).

段鹤,夏文梅,苏晓力,等,2014.短时强降水特征统计及临近预警[J].气象,40(10):1194-1206. Duan H, Xia W M, Su X L, et al, 2014. Features statistics and warning of flash heavy rains[J]. Meteor Mon, 40(10):1194-1206(in Chinese).

段鹤,严华生,王晓君,等,2011.滇南中小尺度灾害天气的多普勒统计特征及识别研究[J].气象,37(10):1216-1227. Duan H, Yan H S, Wang X J, et al, 2011. Analysis on Doppler radar statistical features and distinguishing methods of mesoscale and microscale disastrous weather in southern Yunnan[J]. Meteor Mon, 37(10):1216-1227(in Chinese).

段旭,许美玲,孙绩华,等,2003.一次滇西南秋季暴雨的中尺度分析与诊断[J].高原气象,22(6):597-601. Duan X, Xu M L, Sun J H, et al, 2003. The meso-scale diagnostic study on a heavy rain in Southwest Yunnan autumn[J]. Plateau Meteor, 22(6):597-601(in Chinese).

郝莹,姚叶青,郑媛媛,等,2012.短时强降水的多尺度分析及临近预警[J].气象,38(8):903-912. Hao Y, Yao Y Q, Zheng Y Y, et al, 2012. Multi-scale analysis and nowcasting of short-time heavy rainfall[J]. Meteor Mon, 38(8):903-912(in Chinese).

何钰,陈小华,杨素雨,等,2018.基于“配料法”的云南短时强降水预报概念模型建立[J].气象,44(12):1542-1554. He Y, Chen X H, Yang S Y, et al, 2018. Forecast conceptual model establishment of short-time severe rainfall on Yunnan based on the “ingredients”[J]. Meteor Mon, 44(12):1542-1554(in Chinese).

李德俊,唐仁茂,熊守权,等,2011.强冰雹和短时强降水天气雷达特征及临近预警[J].气象,37(4):474-480. Li D J, Tang R M, Xiong S Q, et al, 2011. Radar features and nowcasting of severe hail and short-time heavy rainfall[J]. Meteor Mon, 37(4):474-480(in Chinese).

李华宏,曹杰,杞明辉,等,2012.雷达风廓线反演在云南强降水预报中的应用[J].高原气象,31(6):1739-1745. Li H H, Cao J, Qi M H, et al, 2012. Application of vertical wind profile from Doppler radar to the forecast of heavy precipitation in Yunnan[J]. Plateau Meteor, 31(6):1739-1745(in Chinese).

李华宏,王曼,曹杰,等,2014.雷达资料在云南一次强降水过程中的三维变分同化试验[J].热带气象学报,30(5):881-893. Li H H, Wang M, Cao J, et al, 2014. The three-dimensional variational assimilation of Doppler radar data for a torrential rain case in Yunnan[J]. J Trop Meteor, 30(5):881-893(in Chinese).

李江波,孔凡超,曾建刚,等,2019.河北省副热带高压外围降水的特征与预报[J].气象,45(11):1539-1549. Li J B, Kong F C, Zeng J G, et al, 2019. Characteristics and predictive focus of torrential rain along the outer boundary of west pacific subtropical high in Hebei Province[J]. Meteor Mon, 45(11):1539-1549(in Chinese).

刘静,才奎志,谭政华,2019.高分辨率模式雷达回波预报能力分析[J].气象,45(12):1710-1717. Liu J, Cai K Z, Tan Z H, 2019. Analysis of radar echo forecasting capability of different high-resolution models[J]. Meteor Mon, 45(12):1710-1717(in Chinese).

- 刘淑媛,郑永光,陶祖钰,2003.利用风廓线雷达资料分析低空急流的脉动与暴雨关系[J].热带气象学报,19(3):285-290. Liu S Y, Zheng Y G, Tao Z Y, 2003. The analysis of the relationship between pulse of LLJ and heavy rain using wind profiler data[J]. J Trop Meteor, 19(3):285-290(in Chinese).
- 龙利民,陈亮,江航东,等,2007.副热带高压外围西北侧一次强对流天气的雷达回波特征[J].暴雨灾害,26(1):68-72. Long L M, Chen L, Jiang H D, et al, 2007. The radar echo characteristics of a severe convection in northwest of subtropical high[J]. Torr Rain Dis, 26(1):68-72(in Chinese).
- 马红,曾厅余,刘少荣,等,2011.滇东北2010年7月三次局地暴雨过程诊断分析[J].暴雨灾害,30(1):51-56. Ma H, Zeng T Y, Liu S R, et al, 2011. Diagnostic analysis of three local rainstorm events over the northeast of Yunnan Province in July 2010[J]. Torr Rain Dis, 30(1):51-56(in Chinese).
- 孙莹,王艳兰,唐熠,等,2011.短时暴雨天气雷达回波概念模型的建立[J].高原气象,30(1):235-244. Sun Y, Wang Y L, Tang Y, et al, 2011. Construction of the radar concept model of short-time rainstorm[J]. Plateau Meteor, 30(1):235-244(in Chinese).
- 王彦,吕江津,周海光,等,2008.暴雨的多普勒天气雷达速度辐合风场特征[J].气象,34(3):63-68. Wang Y, Lv J J, Zhou H G, et al, 2008. Echo characteristics of Doppler velocity in a torrential event[J]. Meteor Mon, 34(3):63-68(in Chinese).
- 许宏波,谢屹然,谢银剑,2016.滇西短时强降水的时空分布特征[J].安徽农业科学,44(16):190-195. Xu H B, Xie Y R, Xie Y J, 2016. Spatial and temporal distribution characteristics of short-time heavy rainfall in west Yunnan Province[J]. J Anhui Agric Sci, 44(16):190-195(in Chinese).
- 许美玲,段旭,杞明辉,等,2011.云南省天气预报员手册[M].北京:气象出版社:97-153. Xu M L, Duan X, Qi M H, et al, 2011. Handbook for Weather Forecasters in Yunnan Province[M]. Beijing:China Meteorological Press:97-153(in Chinese).
- 徐远波,尹恒,谭永秀,等,2009.副高边缘一次局地突发性大暴雨过程的中尺度分析[J].暴雨灾害,28(1):58-63. Xu Y B, Yin H, Tan Y X, et al, 2009. Mesoscale analysis of a local burst heavy rain process in the edge of subtropical high[J]. Torr Rain Dis, 28(1):58-63(in Chinese).
- 薛谌彬,陈娴,吴俞,等,2017.雷达资料同化在局地强对流预报中的应用[J].大气科学,41(4):673-690. Xue C B, Chen X, Wu Y, et al, 2017. Application of radar data assimilation in local severe convective weather forecast[J]. Chin J Atmos Sci, 41(4):673-690(in Chinese).
- 应冬梅,许爱华,黄祖辉,2007.江西冰雹、大风与短时强降水的多普勒雷达产品的对比分析[J].气象,33(3):48-53. Ying D M, Xu A H, Huang Z H, 2007. A comparative analysis of Doppler radar products in hail, gale and short-time heavy rainfall in Jiangxi[J]. Meteor Mon, 33(3):48-53(in Chinese).
- 俞小鼎,2013.短时强降水临近预报的思路与方法[J].暴雨灾害,32(3):202-209. Yu X D, 2013. Nowcasting thinking and method of flash heavy rain[J]. Torr Rain Dis, 32(3):202-209(in Chinese).
- 张崇莉,向明堃,赖云华,等,2011.滇西北高原冰雹、短时强降水的多普勒雷达回波特征比较[J].暴雨灾害,30(1):64-69. Zhang C L, Xiang M K, Lai Y H, et al, 2011. Contrastive analysis of Doppler-radar products on hail and short-time severe rainfall on Northwest Yunnan Plateau[J]. Torr Rain Dis, 30(1):64-69(in Chinese).
- 张腾飞,张杰,郭荣芬,2005.一条中尺度雨带的多普勒雷达回波特征及环境条件分析[J].应用气象学报,16(1):70-77. Zhang T F, Zhang J, Guo R F, 2005. Doppler radar echo feature and environmental condition analysis of a mesoscale rain belt[J]. J Appl Meteor Sci, 16(1):70-77(in Chinese).
- 赵资产,何丽萍,刘兴华,等,2007.一次副热带高压边缘的局地冰雹多普勒雷达回波特征分析[J].气象科学,27(S1):169-174. Zhao X C, He L P, Liu X H, et al, 2007. Doppler radar echo features of local heavy hail near subtropical high[J]. Sci Meteor Sin, 27(S1):169-174(in Chinese).
- 郑永光,张小玲,周庆亮,等,2010.强对流天气短时临近预报业务技术进展与挑战[J].气象,36(7):33-42. Zheng Y G, Zhang X L, Zhou Q L, et al, 2010. Review on severe convective weather short-term forecasting and nowcasting[J]. Meteor Mon, 36(7):33-42(in Chinese).
- 支树林,陈娟,包慧濛,2015.一次副热带高压边缘上大暴雨的中尺度特征分析[J].气象,41(10):1203-1214. Zhi S L, Chen J, Bao H M, 2015. Mesoscale characteristics analysis of rainstorm on the edge of subtropical high[J]. Meteor Mon, 41(10):1203-1214(in Chinese).
- 周雨华,黄小玉,黎祖贤,等,2006.副高边缘暴雨的多普勒雷达回波特征[J].气象,32(1):12-17. Zhou Y H, Huang X Y, Li Z X, et al, 2006. Analysis of Doppler radar echo feature of heavy rain events at the edge of West Pacific subtropical high[J]. Meteor Mon, 32(1):12-17(in Chinese).
- 朱乾根,林锦瑞,寿绍文,等,2007.天气学原理和方法:第4版[M].北京:气象出版社:320-400. Zhu Q G, Lin J R, Shou S W, et al, 2007. Weather Principles and Methods[M]. 4th ed. Beijing: China Meteorological Press:320-400(in Chinese).