# 云南省副高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

云南省气象台,昆明 650100;云南省人工影响天气中心,昆明 650100

提 要:本文统计分析了 2014-2016 年 5-10 月国家站共出现 219 站次的有效短时强降水及 云南省 7 部多普勒天气雷达资料,将云南省副高外围的短时强降水进一步细分为两高辐合 类、单纯副高外围类及副高西侧配合西风槽类。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,降水强度强、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 之间,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的特征,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 ET 及 VIL 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 VWP 中有近一半的个例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逐渐消失则是单纯副 高外围类降水的 VWP 表现最明显的特征。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的特征,与低槽后部带来的冷平流及冷暖气流交汇相对应。

关键词: 副高外围、短时强降水、雷达回波特征

The Radar Echo Characteristics of Short-Time Strong Rainfall

in the Periphery of Subtropical High on Yunnan

HE Yu<sup>1</sup> CHEN Xiaohua<sup>1</sup> LI Yaosun<sup>1</sup> YIN Liyun<sup>2</sup> LI Huahong<sup>1</sup> Yunnan Meteorological Observatory, Kunming 650100; Yunnan Weather Modification Center, Kunming 650100

**Abstract:** Using 219 effective short time strong rainfall at national station and 7 Doppler weather radar data in Yunnan province from May to October in 2014 to 2016. The short time strong rainfall in the periphery of the subtropical high in Yunnan province is further subdivided into two high convergence category, simple periphery of the subtropical high category and the west side of subtropical high with westerly trough category. Preliminary conclusions are as follows: August is the high incidence period of short-time strong rainfall in the periphery of the subtropical high in Yunnan province, and the precipitation period is concentrated in the afternoon and the first half of the night. The two high convergence precipitation distributes along the convergence area, with

**基金项目:**国家局预报员专项(CMAYBY2017—069),国家局预报员专项(CMAYBY2020-121) 第一作者:何钰,主要从事天气预报和分析研究。E-mail: researchNL<mark>76</mark>@126.com

通讯作者: 陈小华, 主要从事短临天气预报和分析研究。E-mail:chenxh724@sina.com

strong precipitation and relatively concentrated falling area. The simple periphery of the subtropical high precipitation mainly located in southern Yunnan, manifested as three large value regions. The west side of subtropical high with westerly trough precipitation is mainly located at the edge of Yunnan province, while the area is scattered. The average intensity of the three types of precipitation echoes is between 35 and 45 dBz, average duration of 9 volume scan. Nearly a quarter of the echoes appears inclination and strong echo gradient, and the precipitation is obviously stronger than the echo which does not appear. In a way that can be uesd 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 the same time as that of the strongest echo, or slightly lagged behind. Nearly half of the two high convergence VWPs have southwesterly or westerly airflow 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 VWP 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 are both exist. Corresponds 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 strong rainfall, radar echo characteristics

# 引 言

西太平洋副热带高压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)。且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顶报都是一大难点。段旭等(2003)讨论了一例特殊的 非汛期发生在滇西南的暴雨过程,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湿气流一侧。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Mβcs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 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 三类,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线外围、低层 700、850hPa及地面系统附近。

短时强降水是1h雨量达20mm或3h雨量达50mm的降水(俞小鼎,2013)。它的发生时间短、降水效率高,致灾性强,同时还伴随有其它强对流天气。而利用卫星、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、VIL、VIL密度、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三种类型,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颈警的重要指标。

云南省的短时强降水是发生频率较高的一类强对流天气,由子其夜雨特征明显,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、颈报难度大。根据前期统计 的结果,主汛期发生在云南省最多的便是副热带高压外围类的短时强降水(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热带高压边缘的暴雨过程,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。并进一步统计了 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(2014),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种类型,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。

而目前应用雷达对副高外围这一单独的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的基础,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 MICAPS4.0系统显示分析常规观测的高空资料,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:两高辐合类(青藏高压及西太平洋副热带高压)、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*)、垂直累积液态水含量(*VIL*)和垂直风廓线(*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 资料说明及各类短时强降水的时空分布特征

由于 2012-2013 年云南省实验室数据库没有雷达基数据资料,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的选取标准(何钰等,2018),统计了 2014-2016 年云南省副高外围类短时强降水过程共计 62 个个例,其中单纯副高外围类共计 24 个个例,两高辐合类共计 23 个个例,副高西侧配合西风槽类共计 15 个个例。同时提取 出了低于第 99%分位短时强降水共计 219 站次,其中两高辐合类短时强降水共计 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。

#### 1.1 各类短时强降水的时间分布特征

根据前期统计结果,可知7、8月份准正压类短时强降水发生频次较高,且集中出现在下午16-18时及午夜02-05时(何铥等,2018)。从图1a的统计也可以看出,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,上午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。



图 1 2014-2016 年 5-10 月各类型短时强降水的逐月(a)及逐小时(b)分布特征 Fig.1 Monthly (a) and hourly (b) distribution of various types of Short-time heavy rainfall from May to October in 2014 to 2016

# 1.2 各类短时强降水的空间分布特征

本节提取出了备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的雨量进行累加,得到 云南省副高外围类短时强降水的空间分布特征。

从图 2 (4) 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,在这里分别称之为青藏高压和西太平洋副热带高压 (西太副高)。短时强降水沿着两高辐合区,呈西北-东南向的带状分布特征,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 2(b)可以看出单纯副高外围类短时强降水对应的副热带高压 587 dagpm 线的脊 线位于 26 °N-28 °N之间,西伸脊点位于 98 °E附近。从降水的分布来看,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-红河西部及文山东部边缘。对应的国家站累积降 水量≥50 mm 的站点为: 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)。而曲靖、昆明东部、红河北部及大理地区几乎没有此 类短时强降水的发生。

而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 2 (c)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作用 的云南省的边缘地区,因此降水落区较前两类呈现出比较分散的特征。对应的国家站累积降 水量≥50 mm 的站点为: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。

总的来说:两高辐合类降水沿着辐合区发展,呈带状分布特征,且降水强度强、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作用的云南省的边缘地区。上述的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。



# 图 2 各类型短时强降水的平均高度场及累积降水分布特征 (a)两高辐合类; (b)单纯副高外围类; (c)副高外围配合西风槽类

Fig.2 Mean height field and cumulative precipitation distribution characteristics of various types of Short-time heavy rainfall

(a) Two high convergence category;
 (b) peripheral of simple subtropical high category
 (c) peripheral of subtropical high coordination with westerly trough category

2 各类短时强降水的雷达回波特征

由于临沧及曲靖雷达 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共计 64 站次,单 纯副高外围类共计 54 站次,副高西侧配合西风槽类共计 38 站次。下面我们就对这 156 个国 家站短时强降水发生时段内的雷达回波特征进行统计分析,分别得出各类型短时强降水的雷 达回波特征。

## 2.1 各类短时强降水的回波形态特征

这里我们将降水过程中回波主体的反射率因子值<35 dBz 的回波称为层云降水回波,将35 dBz 《回波主体的反射率因子值<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回波相 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、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,这与之前统计得出的结论相一致(何轻等,2018)。从云 型加云状所对应的平均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降水量最大,位于30-40 mm的区间;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、平均降水量位于25-30 mm的区间;层云降水则 位于20-30 mm之间。说明絮状及带状的层积混合云或积云由于强度强、覆盖范围广且持续 时间长使得1小时累积降水量大。

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,副高外围配合西风槽类出现3例 大风天气。而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它 强对流天气多且强度强,落区预报难度大,致灾性更严重。

表1 各类短时强降水的回波形态特征及统计时段内伴随的其它强对流天气

	convective weather in statistical perio					
类型	云型	云状	统计时段内伴随的其它强对流天气			
两高	层云 11 块	块状 27 块	冰雹: 2015 年 7 月 31 日 13 时 16 分——曲靖冰雹: 3 cm.			
辐合 类	积云 8 块	絮状 27 块	大风:			
	层积混合云 45 块	带状 10 块	2014年7月29日17时11分——丽江华坪:WSW,17.4m/s;			
			2015 年 8 月 01 日 18 时 15 分——楚雄双柏: N, 17.8 m/s;			

 Table 1
 Echo morphological characteristics of various types of Short-time heavy rainfall and other severe

 convective weather in statistical period

单纯	层云 13 块	块状 33 块	冰雹:2016年8月26日16:37——玉溪江川,冰雹,8cm.
副高 外围	积云7块	絮状 11 块	大风:
类	层积混合云 34 块	带状 10 块	2014年8月4日20时07分——楚雄永仁: W, 18.2 m/s;
			2016年7月30日17时40分——昭迪绥江: 5,18 m/s;
			2010年8月12日10时40分——玉溪勿门: N, 22.7 叫S;
			2016 年 8 月 22 日 03 时 08 分——楚雄牟定: NE, 22.1 m/s;
			2016年8月22日16时40分——昆明呈贡:NE,24.7m/s;
			2016年8月22日17时17分——昆明安宁: E, 18.6 m/s;
			2016年8月22日19时10分——楚雄楚雄: E, 17.3 m/s;
			2016年8月22日19时30分——楚雄元谋: E, 19.7 m/s;
			2016 年 8 月 26 日 15 时 46 分——玉溪通海: S, 17 m/s;
			2016年8月26日17时40分——玉溪易门:NE,18.7m/s;
副高	层云9块	块状 21 块	大风:
西侧	积云7块	絮状 11 块	2014年9月06日15时14分——昆明富民: W, 17.1m/s;
配合			2015 年 8 月 12 日 00 时 39 分 — 曲靖马龙: NW, 18.1 m/s:
西风	层积混合云 22 块	带状6块	2015 年 8 日 19 日 16 时 43 分
槽类			

## 2.2 各类短时强降水的反射率因子、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), 三类短时强降水的回波主体平均强度均在 35-45 dBz 之间, 平均持续9个体档, 约为 54 分钟。最强回波强度平均为 50 dBz, 持续 2 个体扫。且统计得出平均质心高度分别为: 两高辐合类 7.9 km、单纯副高外围类 4.8 km 及 副高西侧配合西风槽类 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 ℃层高度相比,高于 0 ℃层的为高质心,低于 0 ℃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(俞小鼎等,2013。且出现 这些特征的回波对应的降水强度平均位于 28-30 mm/h 的降水区间,较未出现这些特征的回 波降水强度(平均位于 26-28 mm/h)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。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,与其伴随有最多的大风天 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,与副热带高 压南侧的东风气流相对应;而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4m/s,平均最大风速单纯副高外围类达11m/s,其次是副高西 侧配合西风槽类,为9m/s,最小为两高辐合类,6m/s。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 之间,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,中小尺度风场表现为低层辐合的特 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 及强回波梯度区的特征,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,与其伴随有最多的大风天 气个例的统计特征相对应。

表 2	各类短时强降水的反射率因子、	径向速度及其垂直剖面特征(括号内为出现次数)

Short-time heavy rainfall (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		低质心(59)	西南风		MARC (14)	
辐合 类		高质心 (5)	西北风	气旋性辐合 14 个	风暴顶辐散(10)	
				低层辐合、高层辐散	RIJ (6)	
	回波倾斜(15)				垂直风切变(6)	
	强回波梯度(9)				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	回波倾斜(10)	低质心 (50)	东南风		高空大风(17)	
副高 外围 类	强回波梯度(7) 回波悬垂(2)	高质心(4)	东风	气旋性辐合9个	前侧入流急流(9)	
				低层辐合、高层辐散	垂直风切变(7)	

Table 2	The reflectivity factor,	radial velocity and	t it's vertical	profile chai	racteristics o	f various types	s of
	5	5		1		21	
	Short-1	time heavy rainfall	(number of	occurrences	5)		



## 2.3 各类短时强降水的 ET、 VIL 及 VWP 特征。

本节选取了与短时强降水的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都在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;而从垂直累积液态水含量来看,最强 VIL 的平均值从小 到大依次为:两高辐合类 5.8 kg/m<sup>2</sup>,单纯副高外围类 7.4 kg/m<sup>2</sup>,副高西侧配合西风槽类 8.5 kg/m<sup>2</sup>,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。

从水平风垂直廓线(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。且中高层 2-5 km之间存 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 mm/h;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。同时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。且 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),同 时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 各类短时强降水的 ET、VIL 及 VWP 特征

					-
		ET		VIL	VWP(半径 30km 内)特征及
					出现次数
	最强 ET 平	最强 ET 出现时	最大平均	最大 VIL 出现时	
	均值(km)	间/最强回波	值(g/cm <sup>2</sup> )	间/最强回波出	
		出现时间		现时间	
两高辐	12	超前 4/一致 35/	5.8	超前 <b>2/</b> 一致 55/	中低层风向顺转/17;整层风向
合类		滞后 25		滞后 7	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
				7	低层风向逆转/3;降水后无资
		k	XI		料区消失/1;
单纯副	13	超前12/一致	7.4	超前 5/一致 46/	低层东风、东南风/21; 整层风
高外围		24/滞后 18		滞后 3	向较一致型/12;降水后无资
类		1			料区消失 <b>/9</b> ;中低层风向逆转
					<b>/8</b> ;中低层风向顺转 <b>/4</b> ;风切
					变/3:降水后气流增强/2;急
					流下传/1;
副高西	13	超前 <b>3/</b> 一致	8.5	超前 1/一致 35/	中低层或整层风向顺转 11/降
侧配合		19/滞后 16		滞后 2	水开始前后高空西北气流入
N1HG H		10/10/11			

Table 3 The ET  $\$  VIL and VWP characteristics of various types of Short-time heavy rainfall

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

# 3 各类短时强降水典型个例分析

## 3.1 两高辐合类

2015 年 7 月 31 日 20 时-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 m/s 的偏北大风,同时伴随有明显的雷 暴天气。从图 3a 中可以看出: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,且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)、下面以丽江永胜、 昆明太华山及红河河口三家寨三个站作为代表,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≥45 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。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小时雨强分别为 31.2 mm、46.3 mm 及 52.4 mm。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, 顶高最高达 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 mm,降水较强;太华山地区 35 dBz 的底高 基本维持在 2.6 km 日顶高最高达 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 公里,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,同时高层伴随有急流出 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,使得水汽更加容易汇 聚(过程时段内河口三家寨站的 VIL 值达 11 kg/m<sup>2</sup>,远大于其余两个站的 VIL 值),因此小 时雨强更强。而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4-8 m/s,垂直风切变约为2-4 m/s•km。与前期统计的两 高辐合类的风廓线特征一致。

西风槽 类



图 3 2015 年 8 月 1 日 08 时 500 hPa 高度场(a)、2015 年 7 月 31 日永胜(23 时 28 分)、太华山(23 时 05 分)及河口三家寨(21 时 32 分)3D 回波(b)、反射率因子及径向速度垂直剖面(c)、太华山 VWP 特征(d)

Fig.3 500 hPa height field at 08:00 on 1 August 2015 (a) , 3-D echoes at the strongest moment in Yongsheng,
 Taihuashan and Hekou from 20:00 on 31 July to 20:00 on 1 August 2015 (b) , the vertical profile of reflectivity factor and radial velocity (c), the VWP characteristic of Taihuashan

## 3.2 单纯副高外围类

2016 年 8 月 26 日 20 时-8 月 27 日 20 时受副高外围的影响,我省国家站累计出现 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 线控制范围内。其中 590 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。下面就以德宏芒市、西双版纳勐海及景洪三个站作为 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。回波主体强度及持续时间分别为: 35-40 dBz/7 个体扫、30-40 dBz/5 个 体扫及 35-40 dBz/5 个体扫。过程时段内回波对应的小时雨强分别为 52.5 mm、21.5 mm 及 24.6 mm。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 最强达 14.2 km, 最强时段≥50 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 m/s。同时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。且回波伸展高度较低, 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 4-8 m/s,垂直风切变约为 2-6 m/s•km。自 06 时 08 分降水开始 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。



图 4 2016 年 8 月 27 日 08 时 500 hPa 高度场 (a)、2016 年 8 月 27 日芒市 (06 时 08 分)、动海 (11 时 41 分)及景洪 (11 时 52 分) 3D 回波 (b)、反射率因子及径向速度垂直剖面 (c)、芒市 VWP 特征 (d) Fig.4 500 hPa height field at 08:00 on 27 August 2016 (a)、3-D echoes at the strongest moment in Mangshi、 Menghai and Jinghong from 20:00 on 26 to 20:00 on 27 August 2016(b)、the vertical profile of reflectivity factor and radial velocity (c)、 the VWP characteristic of Mangshi

## 3.3 副高西侧配合西风槽类

2015 年 8 月 12 日 20 时-8 月 13 日 20 时受副高西侧西风槽东移的影响,我省国家站累 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。下面就以丽江、普洱景谷及昆明宜良三个站作为代表,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: 45-55 dBz/3 个体扫、35-45 dBz/7 个体扫及 40-50 dBz/7 个体扫。过程时段内回波对应的小时雨强分别为 44 mm、27.3 mm 及 28.4 mm。 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,35dBz 回波顶高 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 m/s, 虽然强回波持续时间不长,但降水效率高,强度强。景谷和宜良回波也都存在倾斜特征,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。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 之间的无资料区逐渐消失,同时偏北气流过后 5.8-7.9 km 的高空又表现为无资料的晴空区。



图 5 2015 年 8 月 13 日 08 时时 500 hPa 高度场及 8 月 12 日 20 时-13 日 20 时西风槽位置(a)、2015 年 8 月丽江(12 日 22 时 11 分)、 景谷(13 日 02 时 38 分)及宜良(13 日 19 时 09 分) 最强时刻 3D 回波(b)、 反射率因子及谷向速度剖面(c)、 宜良 VWP 特征(d)

Fig.5 500 hPa height field from 20:00 on 12 to 20:00 on 13 August 2015(a), 3-D echoes at the strongest moment in Lijiang, Jinggu and Yiliang (b), the vertical profile of reflectivity factor and radial velocity (c), the VWP characteristic of Yiliang

# 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 MICAPS4.0 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,上午10-12时之间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, 并存在三个降水大值区;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 短时强降水强度强、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;且从云状统计来看,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强、覆 盖范围广且持续时间长使得1小时累积降水量大。

(4) 三类短时强降水的回波主体平均强度在 35-45 dBz 之间,平均持续 9 个体扫。且 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,同时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。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,与其伴随有最多的大风天气个例绕计特征相对应。

(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临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;薛谌彬等,2017;刘静 等,2019),因此这方面的研究工作还有继续深入的空间。

## 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, 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(2): 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(2): 1194-1206 (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 "mgredients"[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 Ji 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 formential 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]. Torrential 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]. Torrential 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(2): 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: 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]. Torrential 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, Wa 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、天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. Xin D M, Xu A H, Huang Z H, 2007. A comparative analysis of Doppler radar products in hall, 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(2): 202-209. Yu X D, 2013. Nowcasting thinking and method of flash heavy rain[J]. Torrential Rain Dis, 32(3): 202-209 (in Chanese).
- 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]. Torrential 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).
- 赵贤产,何丽萍,刘学华,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: Meteorological Press: 320-400 (in Chinese).