

文章编号: 2096-1618(2019)01-0063-09

# 基于湿位涡与螺旋度的一次西南低涡强降水分析

吴秋月<sup>1</sup>, 华维<sup>1,2</sup>, 申辉<sup>3</sup>, 李佩芝<sup>1</sup>, 王星<sup>1</sup>

(1. 成都信息工程大学大气科学学院 气候与环境变化联合实验室高原大气与环境四川省重点实验室, 四川成都 610225; 2. 中国科学院大气物理研究所竺可桢——南森国际研究中心, 北京 100029; 3. 中国民航飞行学院新津分院气象台, 四川成都 611431)

**摘要:**利用 NCEP 再分析资料、地面观测资料、FY-2E 卫星 TBB 资料和融合降水资料,应用湿位涡和螺旋度原理,对 2015 年 8 月 17–19 日一次西南低涡强降水过程进行诊断分析,得出以下结论:水汽通量散度辐合区的分布对降雨落区有较好的指示性,中尺度对流云团特征与低涡和降水发展趋势有着密切联系。降雨落区及其中心位置与该时刻 700 hPa 湿位涡有较好的对应关系,降雨中心靠近 MPV1 负值与正值的交界处,而 MPV1 负值区内的降水较弱。对流层中低层 MPV1 负值与 MPV2 正值的重合区是强降水发生的警戒区,并且对流层中低层层结的不稳定、气流的辐合上升运动以及西南温湿气流的输送是此次强降水产生的重要机制。对流层中低层  $z$ -螺旋度正值区的分布对相应时段降水的落区具有较好的指示性,相对螺旋度正值区的大值中心位置与未来 6 h 降水中心的落区呈现出高度一致,且降水中心靠近相对螺旋度正值中心一侧的等值线密集区。

**关键词:**气象学;高原气象;西南低涡;强降水;湿位涡;螺旋度

**中图分类号:**P458.1+21

**文献标志码:**A

**doi:**10.16836/j.cnki.jcu.2019.01.013

## 0 引言

夏季是西南低涡(简称西南涡)高发期,其发生、发展和东移不仅能引起四川盆地和周边地区产生强降水灾害,而且可进一步造成中国长江中下游等地区发生强降水天气过程<sup>[1–7]</sup>。因此,西南涡及其诱发的强降水天气过程一直是关注的重点。近年来许多研究从动力、热力等角度对西南涡强降水灾害过程的形成和发展机理进行了探讨,取得了一系列研究成果,极大丰富了对西南涡及其强降水过程的认识和理解<sup>[8–11]</sup>。此外,随着数值模式性能的不断提高,大量研究采用数值模拟对西南涡及其强降水过程进行了分析,但由于西南地区地形、西南涡致灾机理的复杂性以及数值模式性能等因素限制,数值模式对西南涡移动路径、强降水落区和量级等物理量的模拟和预报性能还有待进一步提高<sup>[12–14]</sup>。

除数值模拟外,一些新型物理诊断量如湿位涡、 $Q$  矢量及螺旋度等也逐渐应用于对灾害性天气引发过程的强降水诊断中。黄楚惠等<sup>[15]</sup>应用湿位涡理论对高原低涡东移所引发的强降水过程进行了诊断研究,认为湿位涡的演变特征与高原涡降水过程的发生发展有很好的关联性,且指出垂直螺旋度与相对螺旋度对降水分布的预报有一定的实用价值。张虹等<sup>[16]</sup>发现垂

直局地螺旋度和积分垂直螺旋度对西南涡强降水分布的变化具有较高的指示意义。宋雯雯等<sup>[17]</sup>认为对流涡度矢量和湿涡度矢量垂直分量大值区的分布和发展与强降水区的移动和发展较一致。相关研究加深了对西南涡及强降水过程的认识,然而由于西南涡致灾机理及动力学机制的复杂性,仍需进一步采用湿位涡、螺旋度等新型诊断量对西南涡典型强降水天气过程进行综合诊断分析。因此,利用美国 NCEP FNL 资料(时间分辨率为 6 h、水平分辨率为  $1^\circ \times 1^\circ$ )、地面常规观测资料、FY-2E 卫星云顶亮温(TBB)资料、中国自动站与 CMORPH 融合降水资料(时间分辨率为 1 h、水平分辨率为  $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ ),应用湿位涡、 $z$ -螺旋度和相对螺旋度等理论对 2015 年 17–19 日一次西南涡强降水过程进行分析,以期对西南低涡强降水的预报预警工作提供一定的参考。

## 1 诊断分析方法

### 1.1 湿位涡

在  $P$  坐标系下,因为垂直速度的水平变化远小于大气水平速度的垂直切变,所以在不考虑垂直速度水平变化的情况下,吴国雄等<sup>[18]</sup>利用原始的大气运动方程推导出的湿位涡守恒的计算公式为

$$MPV = -G(\zeta + f) \frac{\partial \theta_{se}}{\partial p} + g \left( \frac{\partial v}{\partial p} \cdot \frac{\partial \theta_{se}}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial p} \cdot \frac{\partial \theta_{se}}{\partial y} \right) \quad (1)$$

收稿日期:2018-04-18

基金项目:国家自然科学基金资助项目(41775072、91537214、41405069);四川省教育厅重点资助项目(16ZA0203)

$$MPV1 = -g(\zeta + f) \frac{\partial \theta_{se}}{\partial p} \tag{2}$$

$$MPV2 = g \left( \frac{\partial v}{\partial p} \cdot \frac{\partial \theta_{se}}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial p} \cdot \frac{\partial \theta_{se}}{\partial y} \right) \tag{3}$$

其中,  $f$  为科氏参数,  $\zeta$  为垂直涡度,  $\theta_{se}$  为假相当位温, 湿位涡 (MPV) 根据垂直和水平方向的划分可分为湿正压项 (MPV1) 和湿斜压项 (MPV2)。其中, 湿正压项表征了对流稳定性和惯性稳定度的作用, 且主要由假相当位温垂直梯度和空气块绝对涡度垂直分量的乘积决定。北半球绝对涡度通常为正值, 当大气对流稳定时, 即  $\frac{\partial \theta_{se}}{\partial p} < 0$  时,  $MPV1 > 0$ ; 当对流不稳定时, 即  $\frac{\partial \theta_{se}}{\partial p} > 0$  时,  $MPV1 < 0$ 。湿斜压项表征了大气的湿斜压性, 主要由假相当位温的水平梯度和风的垂直切变决定。低层  $MPV2 > 0$  时, 表示水平湿斜压性增加, 有利于垂直涡度增长, 若  $MPV1 < 0$ , 则十分利于降水的发生发展。湿位涡单位为 PVU ( $1\text{PVU} = 10^{-6} \text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$ )。

1.2 z-螺旋度

在  $Z$  坐标系中, 只考虑有上升运动情况下, 即  $w > 0$  时, 垂直螺旋度计算公式为

$$h = w\zeta = -\frac{\omega}{\rho g} \left( \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \right) \tag{4}$$

其中,  $\omega$  为  $p$  坐标系中的垂直速度, 当有上升运动 ( $w > 0$ ) 且存在正涡度 ( $\zeta > 0$ ) 时, 螺旋度为正值; 反之存在负涡度 ( $\zeta < 0$ ) 时, 螺旋度为负值。

1.3 相对螺旋度

由于  $z$ -螺旋度仅考虑了垂直方向的作用而忽略了水平方向的作用, 对于降水天气的诊断而言尚有不足之处, 因此引入考虑环境风场的相对螺旋度 (SRH) 来对此次西南涡强降水进行进一步分析。基于 Woodall<sup>[19]</sup> 的研究结果, Davies-Jones 等<sup>[20]</sup> 提出利用单站探空风资料计算风暴相对螺旋度的方法, 其差分形式为

$$H_{s-r}(C) = \sum_{k=1}^{N-1} [ (u_{k+1} - c_x)(v_k - c_y) - (u_k - c_x)(v_{k+1} - c_y) ] \tag{5}$$

参照寿绍文等<sup>[21]</sup>、黄楚惠等<sup>[22]</sup> 的研究, 采用公式 (5) 计算相对螺旋度, 其中风暴移速  $\vec{C} = (c_x, c_y)$  取 1000 ~ 200 hPa 平均风速的 0.75 倍, 风向定为  $\vec{V}$  的方向右偏 40°。

2 天气概况与 TBB 中尺度特征

2.1 西南涡演变特征

2015 年 8 月 17-19 日, 四川东部至华中地区出现一次由西南涡东移产生强降水天气过程。在 17 日 00 时 (世界时, 下同) 500 hPa 高度场上 (图略), 东亚大槽移至亚洲大陆东岸, 亚洲中高纬地区呈稳定的“两槽两脊”型的环流形势, 蒙古国西部和中国东北部上空分别有一冷低涡带动北方冷空气南下。青藏高原上空的低涡慢慢东移并不断分裂出短波槽, 西平副高高压脊线位于 25°N 附近并逐渐西伸进入内陆。根据西南涡移动路径 (图 1a) 和中心强度变化 (图 1b) (此处将低涡中心位势高度值定义为低涡中心强度) 将此次西南涡天气过程划为两个阶段。第一阶段 (17 日 00 时-18 日 00 时), 受高原东移短波槽影响, 西南涡于 17 日 00 时在四川盆地中部生成, 其中心强度为 3086 gpm, 而西南暖湿气流与南下冷空气在四川盆地上空汇合, 增强了低层气流的辐合运动, 有利于低涡发展加强。此时, 受西太副高西伸及东北气流的影响, 西南涡维持稳定少动。第二阶段 (18 日 00 时-19 日 06 时), 18 日 00 时西南涡东移至盆地东部, 中心强度为 3090 gpm。此后, 由于东北气流减弱以及西太平洋副热带高压北抬, 在西太副高北侧气流引导下, 西南涡东移出盆地, 且强度逐渐减弱, 最终在河南境内消失。

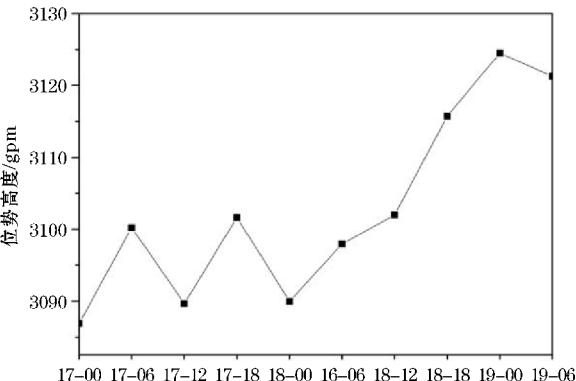
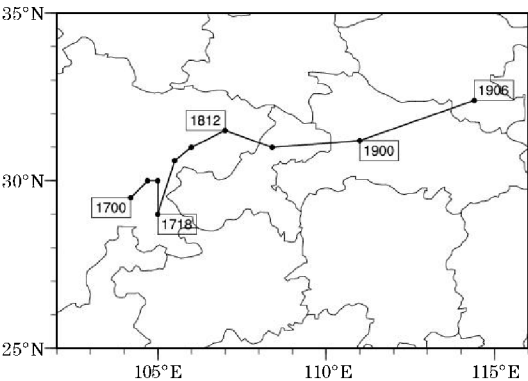


图 1 2015 年 8 月 17 日 00 时-19 日 06 时 700 hPa 西南涡的移动路径和中心位势高度变化曲线

2.2 降水与水汽输送特征

此次西南涡东移造成四川盆地至华中等地区产生大范围强降水过程。由 2015 年 8 月 17 日 24 h 累积降水量分布(图 2a)可见,前期西南涡在四川盆地稳定增强造成川东地区南充、巴中、遂宁和重庆西部等地出现强降水,单站最大累积降水位于四川高坪,达到 334.8 mm。由 18 日 24 h 累积降水量分布(图 2b)可知,降雨中心随着西南涡东移而移至重庆、湖北、湖南及河南一带,降水范围增大,但强度有所减弱。结合水

汽输送情况来看,17 日 00 时西南低涡初生期(图 2c),700 hPa 上四川盆地东北部有一个明显的水汽辐合区,来自孟加拉湾的西南暖湿气流与南下冷空气交汇于四川盆地,形成稳定的辐合区,因而造成较强的上升运动,其辐合中心位于四川南充的强降水中心附近。从 18 日 00 时(图 2b)水汽通量分布图上可见,从重庆北部经湖北西北部到河南中西部水汽通量散度为呈带状负值分布,其辐合中心分别位于重庆北部和河南西部,均与降水中心相对应,但辐合强度相对较弱,且从水汽通量矢量场可以看出,水汽输送带东移趋势显著。

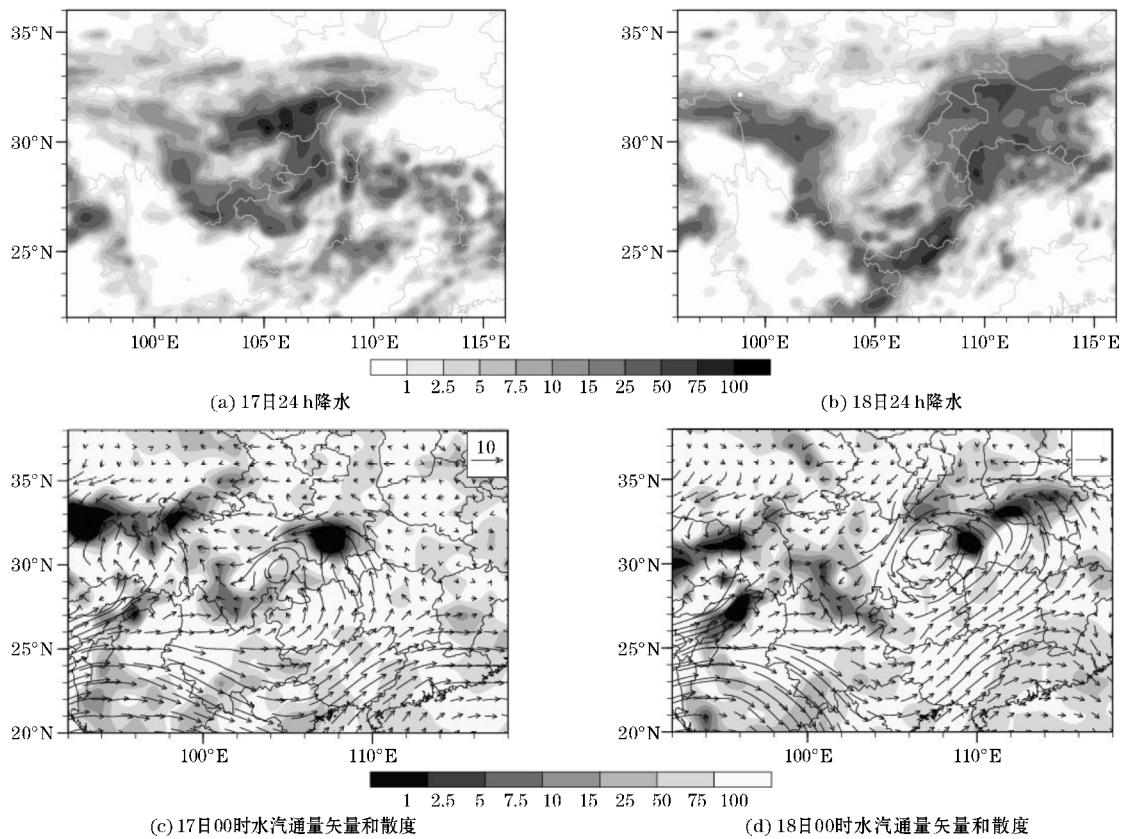


图 2 2015 年 8 月 17 日和 18 日 24 h 累积降水分布;17 日 00 时和 18 日 00 时 700 hPa 水汽通量矢量与散度(阴影区)

2.3 TBB 中尺度特征

红外云顶亮温(TBB)能直接反映中尺度对流云团的发展变化,而中尺度对流云团变化特征与天气系统的发生发展存在密切联系。因此,对西南低涡强降水过程逐时 TBB 进行了分析。由图 3 可见,引发强降水的中尺度对流云团活动同样可分为两个阶段。第一阶段(17 日 00 时-18 日 00 时):对流云团的发生发展主要引发了盆地北部的降水。17 日 00 时,随着西南涡生成,两个中尺度对流云团开始发展,其中一个初生于四川、重庆与贵州交界地区(图 3a)并快速发展;17 日

07 时,第二个云团在川东地区生成并快速发展(图 3b),主要影响盆地东北部,随后有缓慢北上减弱的发展趋势;17 日 16 时,在陕西南部 and 湖北交界处生成新的对流云团(图 3c),且影响范围迅速增大,在山西南部、湖北北部和河南一带形成流云云系,随后东移减弱。第二阶段(18 日 00 时-19 日 06 时):随着西南涡东移减弱,于 18 日 16 时在陕西至河南一带形成新的对流云带,造成新一轮降水。较第一阶段而言,此阶段对流活动有所减弱,降水量也随之减小。总体来看,这 4 个中尺度对流云团发展快速且内部对流活动强,是产生强降水的直接原因。



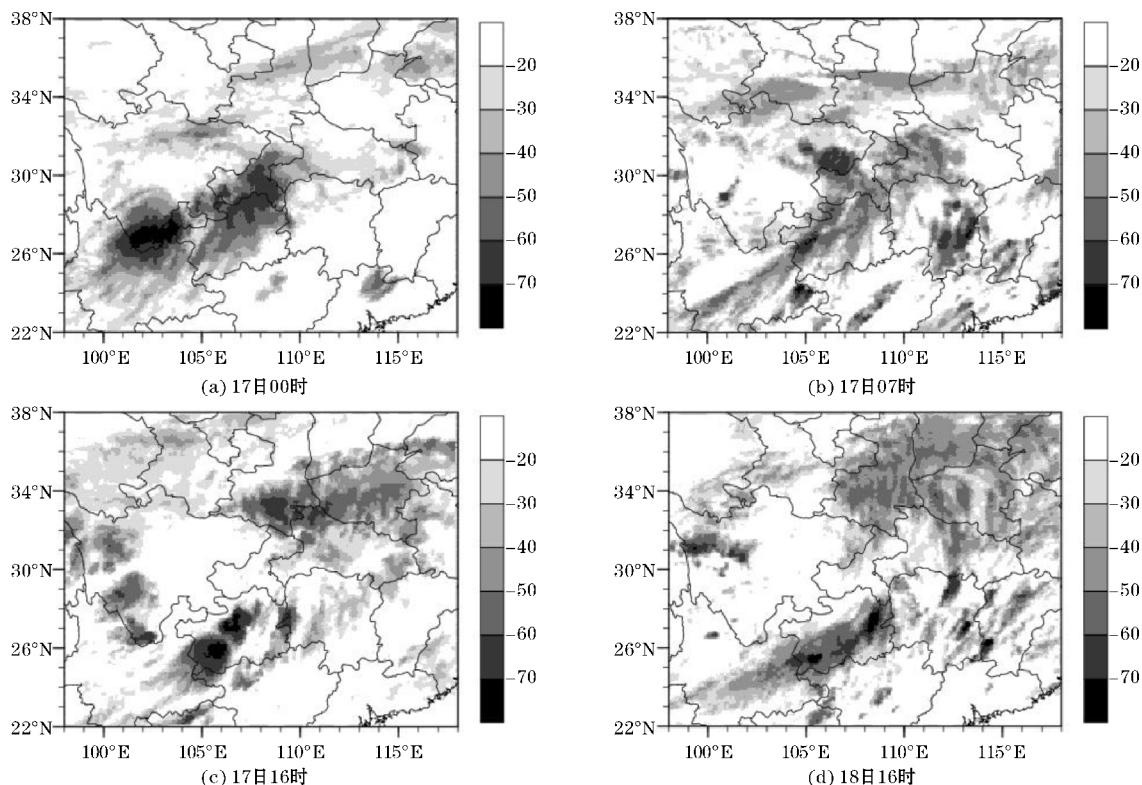


图3 2015年8月17-18日FY-2E红外云图

### 3 湿位涡分析

#### 3.1 湿正压项 (MPV1)

根据湿位涡定义可知,对流不稳定可导致  $MPV1$  为负值,因此主要对  $MPV1$  负值区进行分析。由17日12时(图4a)和18日12时(图4c)700 hPa  $MPV1$  与6 h累积降水量的分布可知,17日12时,在700 hPa上四川盆地西南部涡区存在一  $MPV1$  负值区,中心最小值为-1.0 PVU,说明西南涡涡区对流不稳定性较强,降水大值区位于  $MPV1$  负值区偏东北一侧的正负值交界区。同时,此外华中地区也存在一负  $MPV1$  密集区,此对流不稳定区为西南低涡东移提供了有利条件。18日12时(图4c),随着西南涡东移,  $MPV1$  负值区亦有东移和北抬,其中心区域位于陕西、湖北和重庆的交界地区,且与降水中心相重合,此时降水强度有所减弱。

由17日12时假相当位温  $\theta_{se}$  和流场垂直分布(图5a)可知,强降水落区(104°E~108°E)上空存在明显的上升运动,850~600 hPa存在一  $\theta_{se}$  高值舌(354 k)向低层伸展,且  $\frac{\partial \theta_{se}}{\partial p} > 0$ ,表明该区域为利于强降水发生的高温高湿的不稳定层结。400 hPa以下为  $MPV1$  负

值区(图5b)与  $\theta_{se}$  高温高湿层结重合,充分表征了,大气的对流不稳定性,700 hPa上  $MPV1$  负值区西侧为  $MPV1$  正值区,降雨中心位于正负值交界处,这种  $MPV1$  正负区叠加的分布形势有利于低涡发展,这与相关研究<sup>[15, 23-24]</sup>结论一致。从18日12时  $\theta_{se}$ 、流场(图5d)和  $MPV1$  (图5e)垂直分布来看,降水区域(107°E~114°E)上空的高温高湿不稳定能量和上升运动有所减弱,  $\theta_{se}$  高值舌(352 k)仅伸展到600 hPa附近,800~600 hPa的  $MPV1$  负值区亦有所减弱,表明大气中低层表现为弱对流不稳定,高层大气趋于稳定,从而致使低涡发展减弱,降水随之减少。可见,层结的不稳定以及气流辐合上升叠加高温高湿能量扰动有利于强降水的触发,且在此次强降水过程中,强降水中心靠近  $MPV1$  正负值区交界处,而  $MPV1$  负值区域内降水较弱。

#### 3.2 湿斜压项

由湿位涡原理可知,湿斜压项  $MPV2 > 0$  时大气水平湿斜压性增加,利于垂直涡度增长,若  $MPV1 < 0$ ,则利于降水的发生发展,因此主要分析  $MPV2$  正值区。从17日12时700 hPa  $MPV2$  水平分布(图4b)可见,在四川东部至湖南、湖北一带存在一  $MPV2$  正值带,且存在两个正值中心,分别位于湖南湖北交界处和四川东

部,表明四川东部到湖北、湖南一带上空大气斜压性较强,主要强降水中心位于四川东部的  $MPV2$  正值中心,且该区域内  $MPV1 < 0$  (图 4a),十分有利于西南涡垂直涡度增长及强降水发生发展。18 日 12 时 700 hPa  $MPV2$  水平分布 (图 4d) 上显示,  $MPV2$  正值区中心强

度有所减弱,降水中心位于  $MPV2$  大值中心等值线密集带处,但降水区域中  $MPV1 < 0$  且有所减弱 (图 4c),说明此时西南低涡仍在发展但呈减弱趋势,降水强度也随之减弱。

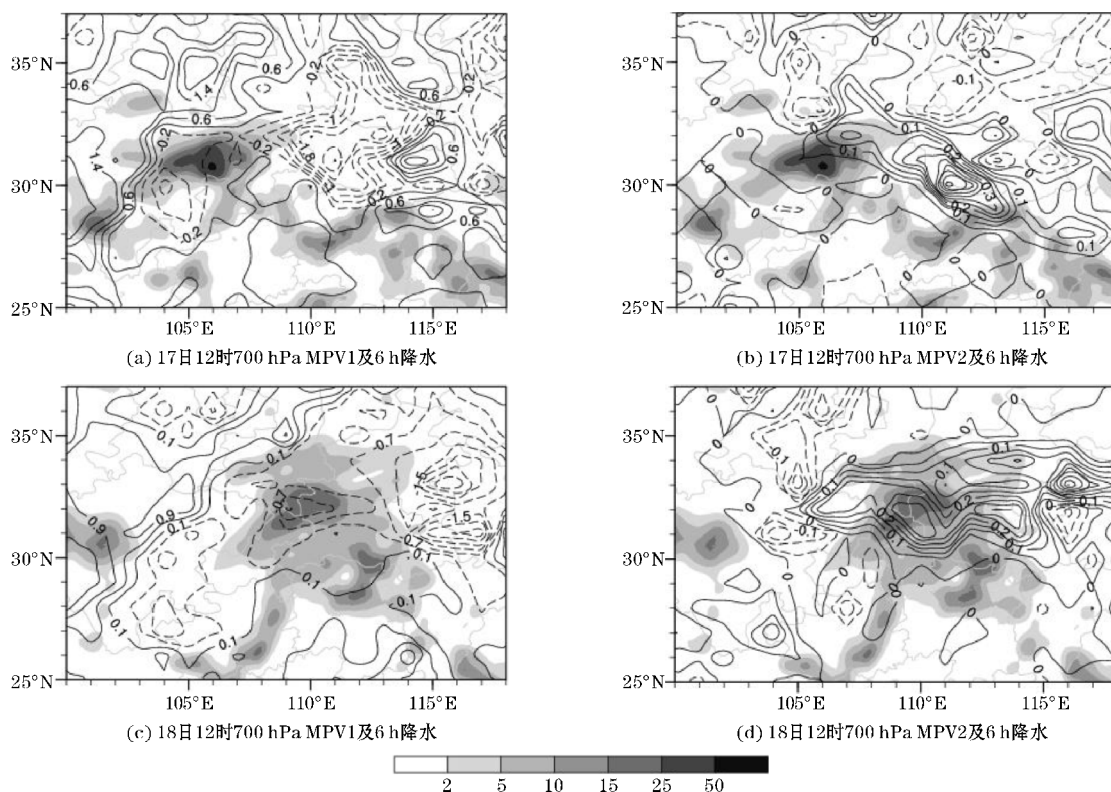


图4 2015年8月17日12时和18日12时700 hPa  $MPV1$ 、 $MPV2$  及6 h 累积降水量分布(阴影区)

由假相当位温  $\theta_{se}$ 、流场和  $MPV2$  垂直分布可知,17 日 12 时 (图 5c) 主要雨区 ( $104^{\circ}\text{E} \sim 108^{\circ}\text{E}$ ) 上空 850 ~ 600 hPa 为  $MPV2$  正值区,中心最大值为 0.6 PVU,表明了大气斜压性较强。降水中心位于低层  $MPV2$  正值区西侧等值线密集处,而此时该区域内  $MPV1$  为负值,表现出对流不稳定,且与高温高湿能量场相叠加,加之强烈的辐合上升运动的大气环境配置十分有助于低涡的发展及强降水的触发。在 18 日 12 时 (图 5f),雨区 ( $107^{\circ}\text{E} \sim 114^{\circ}\text{E}$ ) 上空  $MPV2$  正值区范围有所减小,位于 800 ~ 600 hPa,中心值减弱至 0.4 PVU,该区域内  $MPV1$  强度亦有所减弱,从而导致低涡发展减弱,降雨量也随之减少。由此可见,大气中低层  $MPV2$  正值区及等值线密集区分布特征对低涡发展和降水落区有较好的指示性,且  $MPV1$  负值与  $MPV2$  正值叠加区域和降雨落区有较好的相对关系。此外,对流层中低层强对流不稳定、气流辐合上升运动和西南暖湿气流的持续输送也是都是此次强降水产生重要因素。

## 4 螺旋度诊断分析

### 4.1 $z$ -螺旋度分析

根据  $z$ -螺旋度定义可知,当有上升运动且存在正涡度时,螺旋度为正值,因此主要对  $z$ -螺旋度正值区进行分析。由 17 日 12 时 700 hPa  $z$ -螺旋度和 6 h 降水量分布 (图 6a) 可见,位于四川东部的雨区与  $z$ -螺旋度正值区相重合,降水中心处于  $z$ -螺旋度两个正值中心之间。由 17 日 12 时相对涡度和  $z$ -螺旋度垂直分布 (图 6c) 还可发现,降水中心上空  $z$ -螺旋度正值区从对流层低层一直伸展到 400 hPa 附近,与西南涡正涡度区相重合,表明该区域内存在较强的上升运动,为强降水发生发展提供了有利条件。到 18 日 12 时 (图 6b),主要降水落区分布同样与  $z$ -螺旋度分布保持一致,降水中心仍位于  $z$ -螺旋度等值线密集区内。从垂直方向来看 (图 6d),18 日 12 时降水中心位于西南涡东侧,其



上空  $z$ -螺旋度正值区从800 hPa伸展到650 hPa附近,且仍与西南涡涡度正值区相叠加,但涡度正值区和  $z$ -螺旋度正值区范围均有所缩小, $z$ -螺旋度中心最大值减小到  $42\times 10^{-6} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,在低层115 °E处正涡度区引导

下,亦有东移减弱趋势,表明降水区上空存在较弱的上升运动,西南涡有减弱趋势,降水也随之减弱。可见,  $z$ -螺旋度正值区分布对于降雨落区和强弱有一定的指示意义。

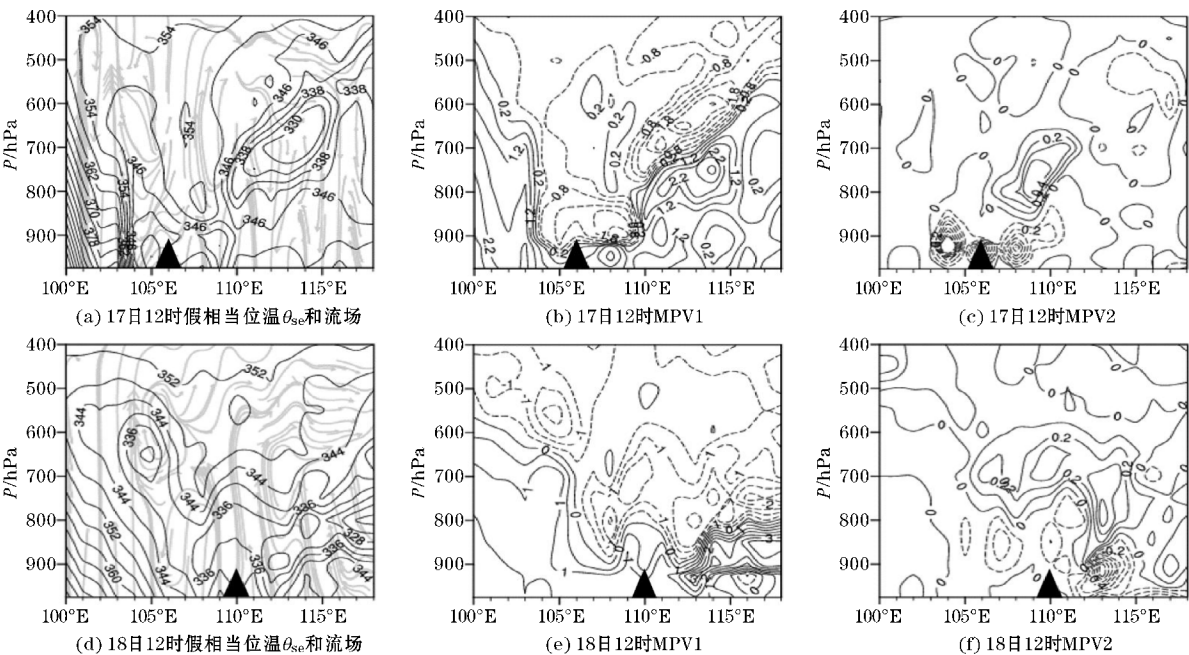


图5 2015年8月17日12时沿30°N和18日12时沿32°N假相当位温 $\theta_{se}$ 和流场、MPV1、MPV2垂直分布(▲为强降水中心)

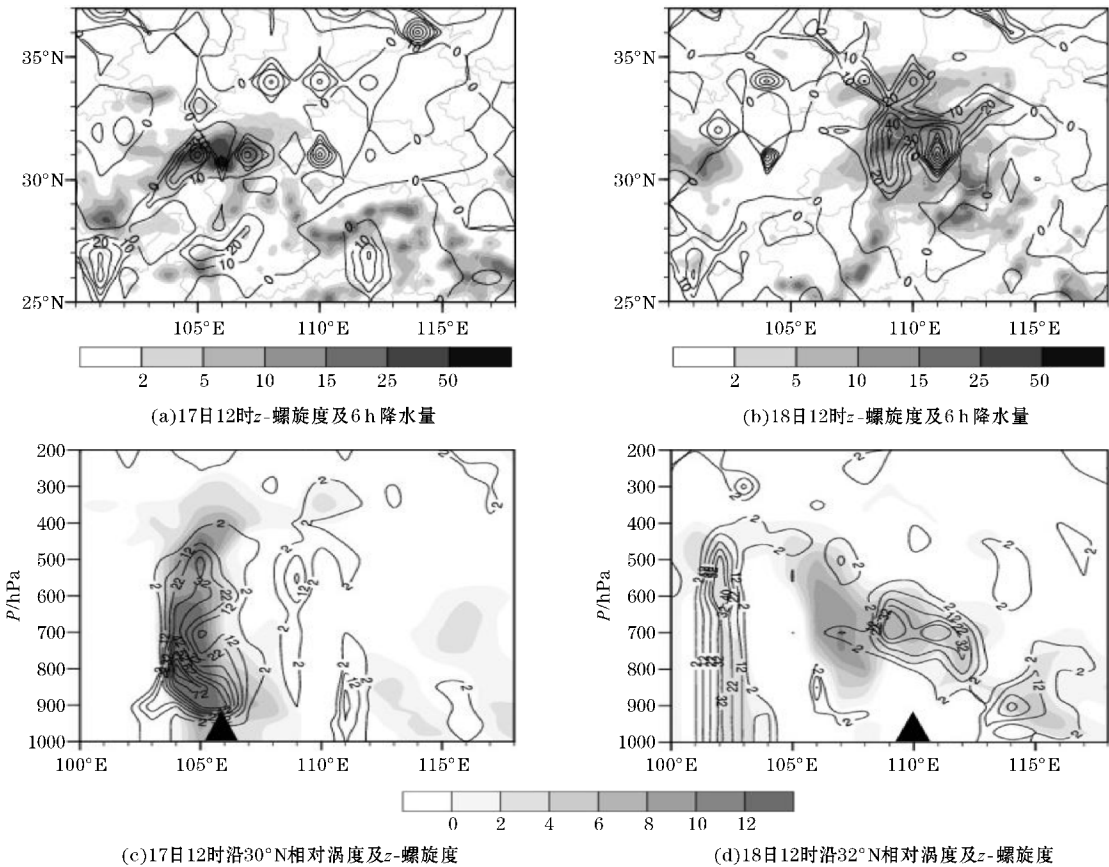


图6 2015年8月17日12时和18日12时  $z$ -螺旋度及6 h降水量(阴影区)水平分布、相对涡度(阴影区)及  $z$ -螺旋度垂直分布(▲为强降水中心)

## 4.2 相对螺旋度分析

图7为相对螺旋度的水平分布。17日12时在四川盆地东北部存在一相对螺旋度正值中心,其中心最大值为 $400\text{ m}^2\cdot\text{s}^{-2}$ ,而6 h降水中心处于相对螺旋度正值中心偏西南一侧的等值线密集处(图7a),而从未来6 h降水分布(图7c)可见,未来6 h降水中心位于相对螺旋度正值中心中且靠近梯度大值区。至18日12时(图7b),相对螺旋度正值区域位于长江中游一带,而降水中心位于其西北侧,可见相对螺旋度正值区相

对降水落区有所东移,但降水中心仍然位于相对螺旋度大值中心附近梯度大值区。而从该时刻未来6 h降水落区分布来看(图7d),其与相对螺旋度正值区分布较一致,降水中心位于相对螺旋度正值中心区域内。可见,相对螺旋度对未来6 h降水落区有着较好的指示性。由于相对螺旋度可以反映出在垂直风切变环境中移动风暴所产生的旋转潜势,因此相对螺旋度正值区在一定程度上能反映出降水区域上空气流的不稳定性,但需要指出的是,相对螺旋度的大小是否能再一定程度上指示出降水的强弱及范围,还有待进一步的研究。

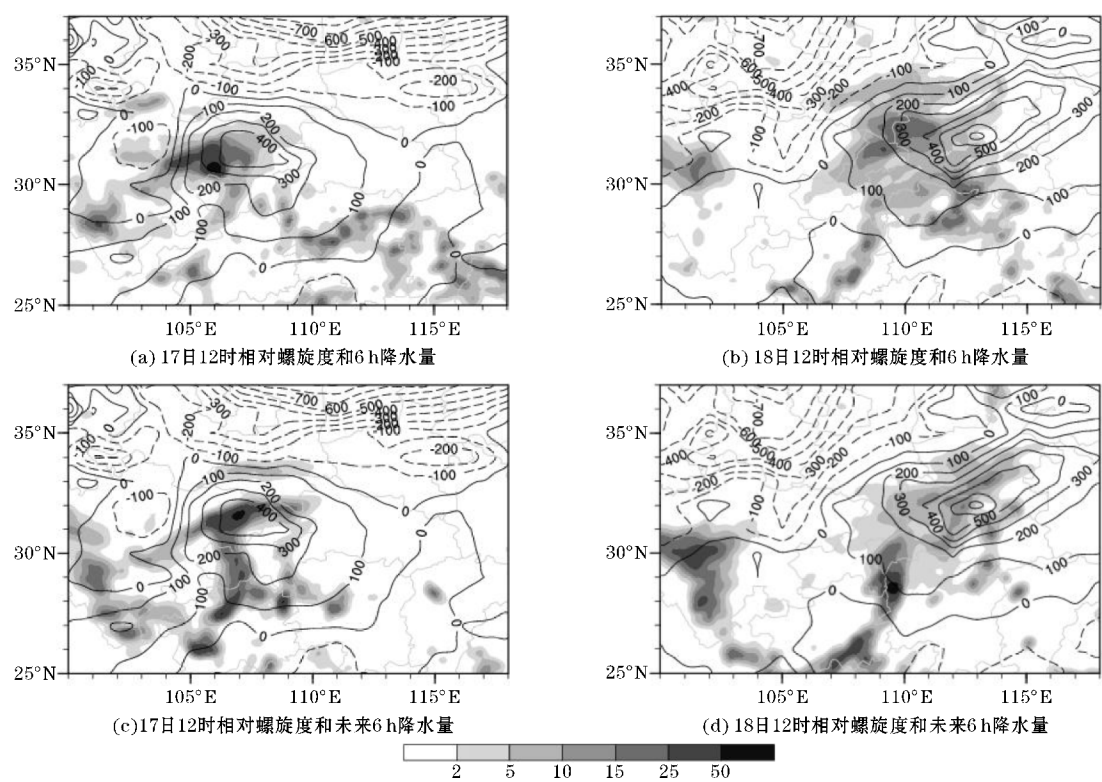


图7 17日12时和18日12时相对螺旋度和6 h降水量(阴影区)及未来6 h降水量分布

## 5 结论

采用NCEP FNL逐6小时的 $1^\circ\times 1^\circ$ 再分析资料、地面常规观测资料、FY-2E卫星云顶亮温(TBB)资料及中国自动站与CMORPH融合的逐时降水资料,根据湿位涡、 $z$ -螺旋度和相对螺旋度等物理量对2015年17–19日一次西南涡强降水过程进行了诊断分析,得到了以下结论:

(1)此次西南低涡天气过程可分为两个阶段。在稳定的“两槽两脊”环流形势中,受青藏高原东移低涡及其短波槽的影响,西南低涡初生于四川盆地南部,由于西太副高西伸的阻碍,西南低涡在四川盆地中保持

稳定少动并逐渐增强;随后,由于副高的北抬及东北气流的减弱且副高北侧气流的引导下,西南低涡逐渐东移减弱,最后消失在河南境内。

(2)这次西南低涡过程造成了中国四川盆地、陕西南部及华中等部分地区的大范围降水,降水落区随着低涡的移动而移动。低涡降水的水汽供应主要来自孟加拉湾,由西南暖湿气流输送到四川东部及华中等地区,暖湿气流与随蒙古低涡南下的冷气流及华北冷气流交汇于四川盆地,形成稳定的水汽辐合,导致强烈的气流上升运动。而且,水汽通量散度辐合区分布及走向对未来降水的分布有一定的指示意义,中尺度对流云团的特征也与低涡及强降水的发生发展存在密切的联系。

(3) 700 hPa湿位涡的空间分布与该时刻降雨落区及其走向有着较好的关联性,强降水中心接近  $MPV1$  正值与负值的交界区,而  $MPV1$  负值区的降水较弱;对流层中低层  $MPV2$  的正值区及其密集等值线的分布对相应时段降水的落区对应较好,且中低层  $MPV1$  负值与  $MPV2$  正值的叠加分布区域是产生强降水的警戒区。此外,对流层中低层层结的不稳定、气流的辐合上升运动和西南温湿气流的输送是此次强降水产生的重要机制。

(4) 对流层中低层  $z$ -螺旋度正值区大值中心的分布对该时刻降水中心及雨带走向具有较好的指示性;对流层中低层正涡度增长、强烈的气流辐合上升运动是强降水发生的有利机制。相对螺旋度正值区的分布与降雨落区及走向存在较好的关联性,相对螺旋度的正值中心与未来6 h降雨中心的位置呈现出高度一致,且降水中心靠近相对螺旋度正值区等值线密集处。

应用3种新型的物理诊断量对一次西南低涡强降水过程做了初步的诊断研究,以期望对西南低涡引发强降水的预报预警工作提供参考,所得结论还需要更多的西南低涡降水个例进行验证,并且新型物理量在西南低涡降水个例诊断研究中的应用还有待进一步加强。

致谢:感谢成都信息工程大学科研项目(J201516)对本文的资助

## 参考文献:

- [1] 卢敬华. 西南低涡概论[M]. 北京:气象出版社, 1986.
- [2] 陈启智,黄奕武,王其伟,等. 1990–2004年西南低涡活动的统计研究[J]. 南京大学学报(自然科学版), 2007, 43(6): 633–642.
- [3] 何光碧. 西南低涡研究综述[J]. 气象, 2012, 38(2): 155–163.
- [4] 郁淑华,高文良. 高原低涡与西南涡结伴而行的不同活动形式个例的环境场和位涡分析[J]. 大气科学, 2017, 41(4): 831–856.
- [5] 李国平,刘行军. 西南低涡强降水的湿位涡诊断分析[J]. 应用气象学报, 1994, 5(3): 354–360.
- [6] 陈忠明,徐茂良,闵文彬,等. 1998年夏季西南低涡活动与长江上游强降水[J]. 高原气象, 2003, 22(2): 162–167.
- [7] 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.
- [8] 段海霞,陆维松,毕宝贵. 凝结潜热与地表热通量对一次西南低涡强降水影响分析[J]. 高原气象, 2008, 27(6): 1315–1323.
- [9] 顾清源,周春花,青泉,等. 一次西南低涡特大强降水过程的中尺度特征分析[J]. 气象, 2008, 34(4): 39–47.
- [10] 江玉华,杜钦,赵大军,等. 引发四川盆地东部强降水的西南低涡结构特征研究[J]. 高原气象, 2012, 31(6): 1562–1573.
- [11] 刘晓波,储海. 一次西南低涡东移引发长江中下游强降水的诊断研究[J]. 气象, 2015, 41(7): 825–832.
- [12] 赵大军,江玉华,李莹. 一次西南低涡强降水过程的诊断分析与数值模拟[J]. 高原气象, 2011, 30(5): 1158–1169.
- [13] 卢萍,李跃清,郑伟鹏,等. 影响华南持续性强降水的西南涡分析和数值模拟[J]. 高原气象, 2014, 33(6): 1457–1467.
- [14] 刘晓冉,李国平. 一次东移型西南低涡的数值模拟及位涡诊断[J]. 高原气象, 2014, 33(5): 1204–1216.
- [15] 黄楚惠,顾清源,李国平,等. 一次高原低涡东移引发四川盆地强降水的机制分析[J]. 高原气象, 2010, 29(4): 832–839.
- [16] 张虹,李国平,王曙东. 西南涡区域强降水的中尺度滤波分析[J]. 高原气象, 2014, 33(2): 361–371.
- [17] 宋雯雯,李国平. 两类涡度矢量对四川盆地一次强降水过程的分析应用[J]. 高原气象, 2016, 35(6): 1464–1475.
- [18] 吴国雄,蔡雅萍,唐晓菁. 湿位涡和倾斜涡度发展[J]. 气象学报, 1995, 53(4): 387–405.
- [19] Woodall G R. Qualitative Forecasting of Tornado Activity Using Storm-relative Environmental Helicity Preprint[C]. 16th conference on severe local storm helicity, 1990: 311–315.
- [20] Davies-Jones R P, D W Burgess, M Foster. Test of Helicity as Tornado Forecasting Parameter. Preprint, 16th Conference on severe local storms [C]. Kananaskis Park, AB, Canada, Amer Meteor Soc, 1990: 588–593.
- [21] 寿绍文,王祖锋. 1991年7月上旬贵州地区强降水过程物理机制的诊断研究[J]. 气象科学, 1998, 18(3): 231–238.



- [22] 黄楚惠,李国平. 基于螺旋度和非地转湿  $Q$  矢量的一次东移高原低涡强降水过程分析[J]. 高原气象,2009,28(2):319-326.
- [23] 赖绍钧,何芬,赵汝汀,等. “龙王”(LONG-WANG)台风过程湿位涡的诊断分析[J]. 气象科学,2007,27(3):266-271.
- [24] 李静楠,潘晓滨,臧增亮,等. 一次华北强降水过程的湿位涡诊断分析[J]. 强降水灾害,2016,35(2):158-165.

## Diagnostic Analysis of a Southwest Vortex Rainstorm based on Moist Potential Vorticity and Helicity

WU Qiuyue<sup>1</sup>, HUA Wei<sup>1,2</sup>, SHEN Hui<sup>3</sup>, LI Peizhi<sup>1</sup>, WANG Xin<sup>1</sup>

(1. School of Atmospheric Sciences, Joint Laboratory of Climate and Environment Change, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China; 2. Nansen-Zhu International Research Centre, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100081, China; 3. Meteorological Observatory of Civil Aviation Flight Xinjin Sub-University, Chengdu 611431, China)

**Abstract:** Using NCEP re-analysis data, the observation data, FY-2E TBB data and merged precipitation data, applying the theories of moist potential vorticity and helicity, a diagnostic analysis of a Southwest Vortex rainstorm process from 17 to 18 August 2015 was carried out. The results are as the following: the distribution of the convergence region of moisture flux divergence can be taken as a good indicator for rainfall area and the characteristics of mesoscale convective cloud clusters are closely related to the development of Southwest Vortex and precipitation. The spatial distribution of the 700 hPa moist potential vorticity has a good correspondence with rainfall area and its center location in the corresponding period. The strong rainfall center is near the junction of the negative value area and the positive value area of  $MPV1$ , while the rainfall in the negative value area of  $MPV1$  is weak. The overlapping area of the negative value of  $MPV1$  and the positive value of  $MPV2$  in the mid-low troposphere is a warning area for the storm. Stratification instability, upward movement of intensive convergence and the transfer of southwest warm and humid air in the midlow troposphere are important mechanisms for the generation of the rainstorm. The distribution of the positive value area of  $z$ -helicity can give good indication to rainfall area in the corresponding period. The center position of the positive value area of relative helicity is highly consistent with the next 6 h precipitation center, and the precipitation center is close to the densest isolines by the side of the positive value center of relative helicity.

**Keywords:** meteorology; plateau meteorology; southwest vortex; rainstorm; moist potential vorticity; helicity