

# 马关县三次不同背景下暴雨成因和 雷达特征分析

张璐<sup>1\*</sup>, 段雪影<sup>1</sup>, 王郦<sup>2</sup>

<sup>1</sup>马关县气象局, 云南 文山

<sup>2</sup>文山州气象局, 云南 文山

收稿日期: 2025年6月2日; 录用日期: 2025年7月2日; 发布日期: 2025年7月9日

## 摘要

本文利用ERA5  $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 逐小时的再分析资料、Micaps国家站和区域自动站气象要素资料、文山雷达资料等, 对马关地区三次不同背景下的暴雨过程天气背景、成因及雷达特征进行了分析, 结果表明: 个例1是一次台风残余低压暴雨, 个例2是副高边缘型暴雨, 个例3是低涡切变型暴雨。天气系统稳定造成降水时间长, 是形成三次暴雨的重要原因。分析探空特征可见, 三次个例均有一定的对流能量, 对流抑制小, 抬升凝结高度低, K指数在 $40^\circ\text{C}$ 附近, SI指数 $<0^\circ\text{C}$ 。个例1和个例3湿层深厚, 有利于短时强降水的出现, 个例2中400 hPa有干冷空气有利于出现短时强降水和大风。分析暴雨成因可见, 降水受水汽、垂直运动加强而加强, 且水汽和垂直运动增强可较降水增强提前1~2小时。另外, 位势不稳定触发也可增强降水。雷达特征上, 个例1和个例2以层状云降水为主, 最大反射率因子超过40 dBZ。马关地区持续受回波影响, 形成列车效应。垂直剖面上, 回波质心低。径向速度特征上, 个例1中有“S”形特征, 说明有暖平流; 个例3中有风场的切变。个例2中最强时段降水有对流性, 19日17点11分回波呈块状, 中心强度超过50 dBZ。垂直剖面上, 马关回波发展高度较高, 可伸展至7~8 km高度。径向速度图上有速度辐合, 辐合层厚度超过5 km。

## 关键词

暴雨, 高原涡, 低涡, 暖平流, 位势不稳定, 列车效应

# Analysis of Causes and Radar Characteristics of Three Heavy Rain Events in Maguan under Different Synoptic Situations

Lu Zhang<sup>1\*</sup>, Xueying Duan<sup>1</sup>, Li Wang<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Maguan Meteorological Observatory, Wenshan Yunnan

\*通讯作者。

<sup>2</sup>Wenshan Meteorological Observatory, Wenshan YunnanReceived: Jun. 2<sup>nd</sup>, 2025; accepted: Jul. 2<sup>nd</sup>, 2025; published: Jul. 9<sup>th</sup>, 2025

## Abstract

Three heavy rainfall events in Maguan, Yunnan Province were investigated through integrated analysis of multi-source datasets, including hourly ERA5 reanalysis data ( $0.25^\circ \times 0.25^\circ$  resolution), surface observations from MICAPS national stations and regional automatic weather stations (AWS), and Doppler radar data from Wenshan. The synoptic configurations, physical mechanisms, and radar characteristics were analyzed under three distinct meteorological backgrounds. The results showed that: case 1 was under a typhoon remnant low-pressure system, case 2 was under the western periphery of the subtropical high, and case 3 was under a low-level vortex and shear line complex. Quasi-stationary synoptic patterns sustained prolonged rainfall. Sounding data exhibited a certain amount of convective available potential energy, low convective inhibition and lifting condensation levels, with K index around  $40^\circ\text{C}$ , and SI index less than  $0^\circ\text{C}$ . Deep saturated layers in cases 1 and 3 promoted high precipitation efficiency, while mid-level dry intrusion at 400 hPa in case 2 enhanced downdraft. The analysis of the causes of rainstorms showed that precipitation was strengthened by the enhancement of water vapor and vertical motion, and the enhancement of water vapor and vertical motion could be 1~2 hours earlier than the enhancement of precipitation. In addition, unstable potential triggering could also enhance precipitation. Radar observations showed that in case 1 and case 2, precipitations were dominated by stratocumulus, with a maximum reflectivity exceeding 40 dBZ. Maguan continued to be affected by echoes, forming a train effect. On the vertical section, the center of mass of the echo was low. In terms of radial velocity characteristics, there was an "S"-shaped feature in case 1, indicating the presence of warm advection. There was wind shear in case 3. In case 2, the precipitation during the strongest period was convective, with a block-shaped echo at 17:11 on the 19th and a central intensity exceeding 50 dBZ. On the vertical section, the echo development height of Maguan was relatively high, which could extend to a height of 7~8 km. There was velocity convergence on the radial velocity map, with a convergence layer thickness exceeding 5 km.

## Keywords

Rainstorm, Plateau Vortex, Low-Level Vortex, Warm Advection, Potential Instability, Training Effect

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Open Access

## 1. 引言

云南省地处低纬高原，地形复杂多样，局地暴雨频发且具有突发性强、历时短、雨量集中等特点，常引发山洪、滑坡、泥石流及城市内涝等次生灾害，对人民生命财产安全造成严重威胁[1]。马关县位于云南省东南部，地处哀牢山余脉与滇东南喀斯特地貌过渡带，受复杂地形与季风环流共同影响，暴雨事件频发且局地特征显著。例如，2015年9月27日马关县遭遇特大暴雨，单日降水量突破历史极值，导致交通中断、农田损毁，凸显了该地区暴雨灾害的严峻性。然而，现有研究多聚焦于云南典型区域(如昆明)的暴雨过程，针对马关地区暴雨的系统性研究仍较匮乏，其形成机制、中小尺度特征及地形效应尚未明确，制约了精细化预报能力的提升[2]-[5]。

已有研究表明,云南夏季常受孟加拉湾风暴、西行台风、副热带高压、高原低涡、切变线等天气系统的影响,产生暴雨[1][6]。例如,副热带高压外围型暴雨常伴随西南或东南水汽输送,而高原低涡切变则通过动力抬升触发强对流[7]。此外,地形对暴雨的增幅作用显著,如昆明主城区的喇叭口地形可增强辐合并延长降水时间[8]。

马关地区地处滇东南迎风坡,地形坡度陡峭,可能通过强迫抬升机制加剧水汽辐合,但其具体作用机制仍需量化分析。同时,数值模拟显示,暴雨过程中低层水汽通量散度与垂直上升运动的时空配置对雨强分布具有关键指示意义[4][9],而马关地区在此方面的研究尚属空白。鉴于此,本研究以马关地区暴雨为对象,分析三次不同背景下暴雨过程的环流形势、形成原因及雷达特征,为提升该地区暴雨预报精度和防灾减灾能力提供科学依据。

## 2. 资料与方法

本文采用的资料主要包括:(1)马关市地面常规观测站和加密自动站逐小时的温、压、湿、风等常规气象要素观测资料;(2)ERA5  $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ 逐小时的再分析资料;(3)蒙自探空站的探空资料;(4)文山S波段多普勒雷达的产品资料。

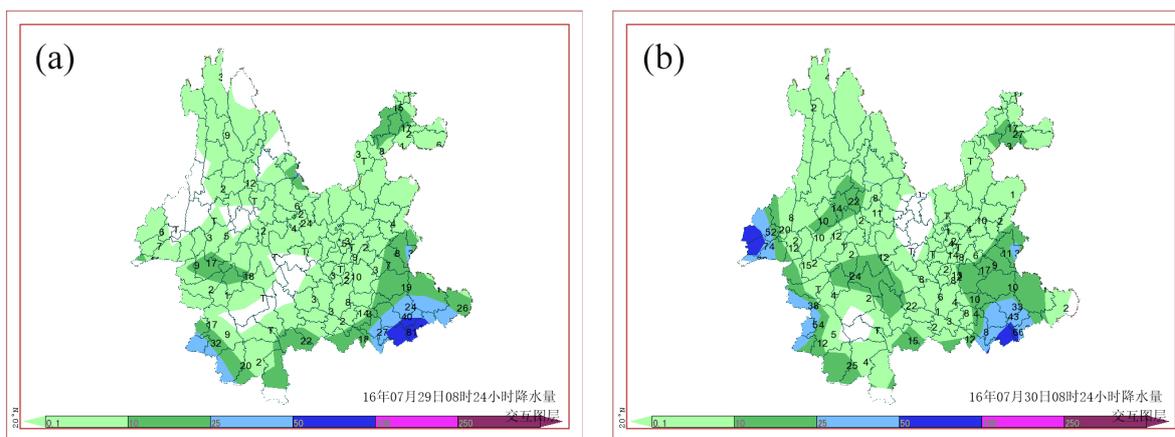
## 3. 天气实况与背景分析

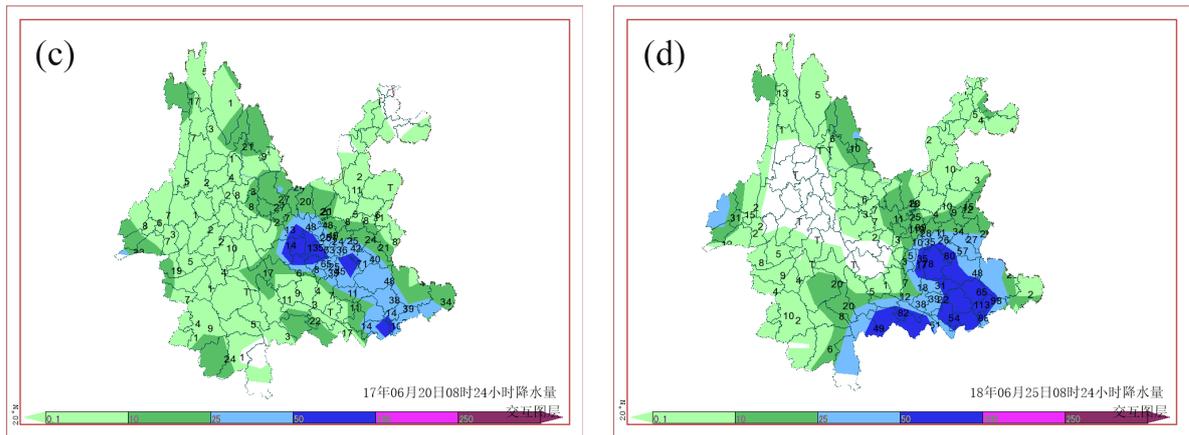
### 3.1. 天气实况

个例1,2016年第3号台风“银河”于7月28日00:20在越南北部南定省沿海登陆,登陆时中心附近最大风力达10级,中心最低气压982 hPa。登陆后,“银河”减弱为热带风暴级。28日08时台风中心位于越南北部,此时马关位于台风的第二象限。随着台风西行、受内陆摩擦减弱影响,台风逐渐减弱为热带低压,20时低压在马关打转。受其影响,马关县28日08时至29日20时发生了一次台风型暴雨过程。受台风“银河”残余低压影响,过程累积雨量达137.8 mm,其中28日08时至29日08时24小时累积雨量达80.8 mm(图1(a)),29日08时至30日08时24小时累积雨量达66.5 mm(图1(b)),最大小时雨强为22.9 mm,出现在29日09时~10时(图2(a))。

个例2,2017年6月19日08时至20日20时马关地区出现暴雨过程,过程累积雨量达113.9 mm,19日08时至20日08时24小时累积雨量达100.0 mm(图1(c)),最大小时雨强为33.9 mm,出现在19日18时(图2(b))。

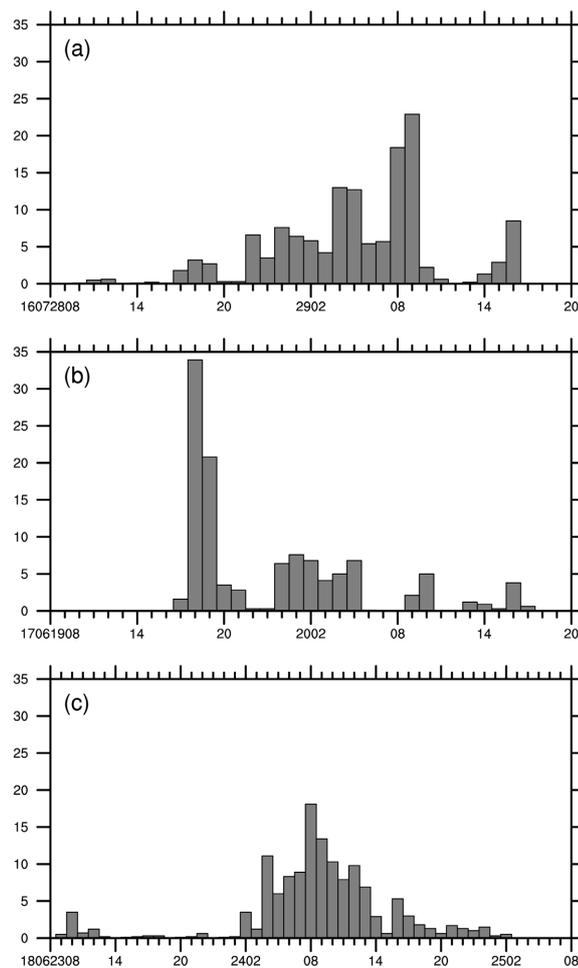
个例3,2018年6月23日08时~25日08时马关过程累积雨量达135.4 mm,其中24日08时至25日08时24小时累积雨量达88.2 mm(图1(d)),最大小时雨强为18.1 mm,出现在24日08时(图2(c))。





**Figure 1.** 24-hour accumulated precipitation from MICAPS (shaded, unit: mm). (a) Case 1: 08:00 BST 28 July to 08:00 BST 29 July 2016; (b) Case 1: 08:00 BST 29 July to 08:00 BST 30 July 2016; (c) Case 2: 08:00 BST 19 June to 08:00 BST 20 June 2017; (d) Case 3: 08:00 BST 24 June to 08:00 BST 25 June 2018

**图 1.** MICAPS 24 小时累积降水(阴影, 单位: mm)。(a) 个例 1 2016 年 7 月 28 日 08 时至 29 日 08 时; (b) 个例 1 2016 年 7 月 29 日 08 时至 30 日 08 时; (c) 个例 2 2017 年 6 月 19 日 08 时至 20 日 08 时; (d) 个例 3 2018 年 6 月 24 日 08 时至 25 日 08 时

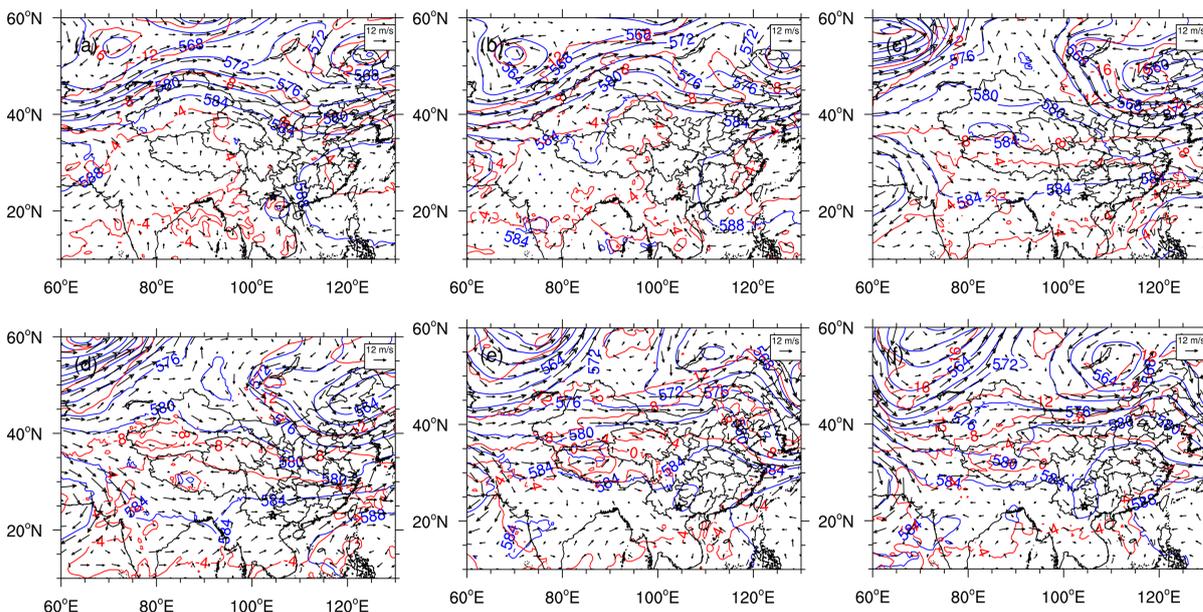


**Figure 2.** Hourly precipitation variation (unit: mm) of Maguan observe station. (a) Case 1; (b) Case 2; (c) Case 3

**图 2.** 马关站 1 小时降水量(单位: mm)随时间的变化。(a) 个例 1; (b) 个例 2; (c) 个例 3

### 3.2. 大气形势

个例 1 中, 500 hPa (图 3(a)、图 3(b))28 日 08 时亚欧中高纬两槽一脊, 乌拉尔山东部和内蒙古东部为槽, 并伴有低涡, 贝加尔湖东部为一脊。中纬度地区有两大高压影响, 分别是伊朗高压和西太平洋副热带高压, 两高之间以均压场为主, 引导气流弱, 有一台风低压影响越南北部。2908 中高纬度两槽一脊东移。中低纬度副高增强, 云南受两高之间均压场控制, 马关有风场的辐合。700 hPa (图 4(a)、图 4(b)) 28 日 08 时云南省主要位于台风低压第二象限, 随着台风低压继续西行, 马关逐渐受第一象限影响。至 2908 时, 低压中心移出文山, 马关位于低压东侧切变线附近。

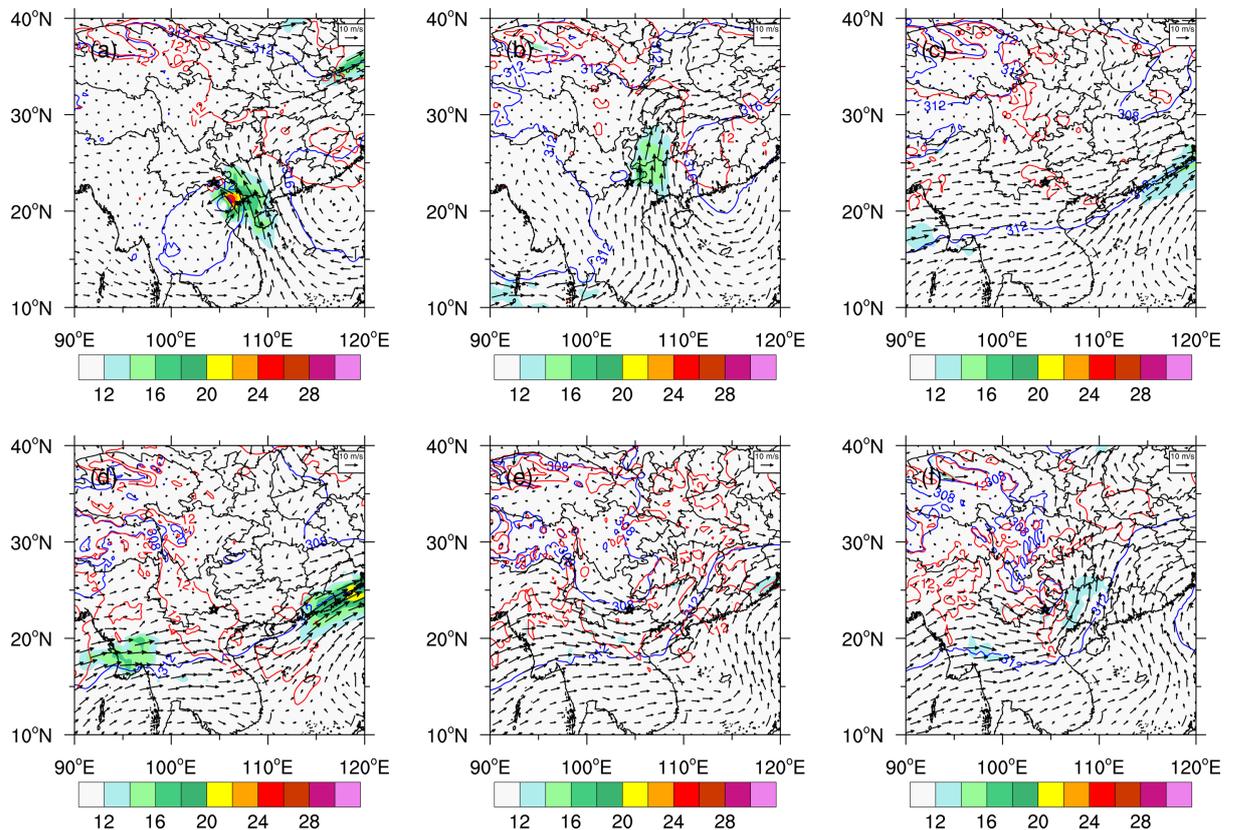


**Figure 3.** ERA5 reanalysis data at 500 hPa: wind field (vectors, unit: m/s), temperature (red contours, unit: °C) and geopotential height field (blue contours, unit: dagpm). 2016 July: (a) 08:00 BST 28 July, (b) 08:00 BST 29 July; 2017 June: (c) 08:00 BST 19 June, (d) 20:00 BST 19 June; 2018 June: (e) 20:00 BST 23 June, (f) 08:00 BST 24 June

**图 3.** ERA5 再分析资料 500 hPa 风场(矢量, 单位: m/s)、温度场(红色等值线, 单位: °C)和位势高度场(蓝色等值线, 单位: dagpm)。2016 年 7 月: (a) 28 日 08 时, (b) 29 日 08 时; 2017 年 6 月: (c) 19 日 08 时, (d) 19 日 20 时; 2018 年 6 月: (e) 23 日 20 时, (f) 24 日 08 时

个例 2 中, 500 hPa (图 3(c)、图 3(d)) 19 日 08 时中高纬两槽一脊, 乌拉尔山东部和东北北部均有低涡, 东北北部低涡中心气压低于 560 dagpm, 贝加尔湖西部为一脊, 引导冷空气南下影响中纬度地区。马关位于 588 dagpm 和 584 dagpm 之间, 有短波槽影响。19 日 20 时两槽一脊稳定少动, 脊前冷空气南下位置更深。低纬短波槽加深, 副高略有增强。脊前冷空气向南输送, 易在副高北侧高能高湿区激发对流。700 hPa (图 4(c)、图 4(d)) 19 日 08 时马关上游有弱的切变, 19 日 20 时马关附近切变加深。切变线位于低涡底部, 有利于弱冷空气向南渗透, 有利于激发对流[6]。

个例 3 中, 500 hPa (图 3(e)、图 3(f)) 23 日 20 时高纬两槽两脊, 中纬度多短波槽活动。低纬分别受伊朗高压和西太平洋副热带高压影响, 副高脊线位置约 25°N, 马关处于两高之间, 受高原涡影响。24 日 08 时高纬槽脊位置稳定少动, 短波槽向南加深与高原涡合并, 西太副高西移。后期副高持续加强西伸, 阻挡短波槽东移, 马关长时间处于短波槽前, 为降水持续提供了非常有利的大尺度环流形势。期间 700 hPa (图 4(e)、图 4(f))马关受低涡切变影响, 切变线位置稳定, 马关处于切变线前部上升气流区, 其上不断有高原涡生成后消失。



**Figure 4.** ERA5 reanalysis data at 700 hPa: wind field (vectors; color shading for wind speeds  $\geq 12$  m/s, unit: m/s), temperature (red contours, unit:  $^{\circ}\text{C}$ ) and geopotential height field (blue contours, unit: dagpm). 2016 July: (a) 08:00 BST 28 July, (b) 08:00 BST 29 July; 2017 June: (c) 08:00 BST 19 June, (d) 20:00 BST 19 June; 2018 June: (e) 20:00 BST 23 June, (f) 08:00 BST 24 June

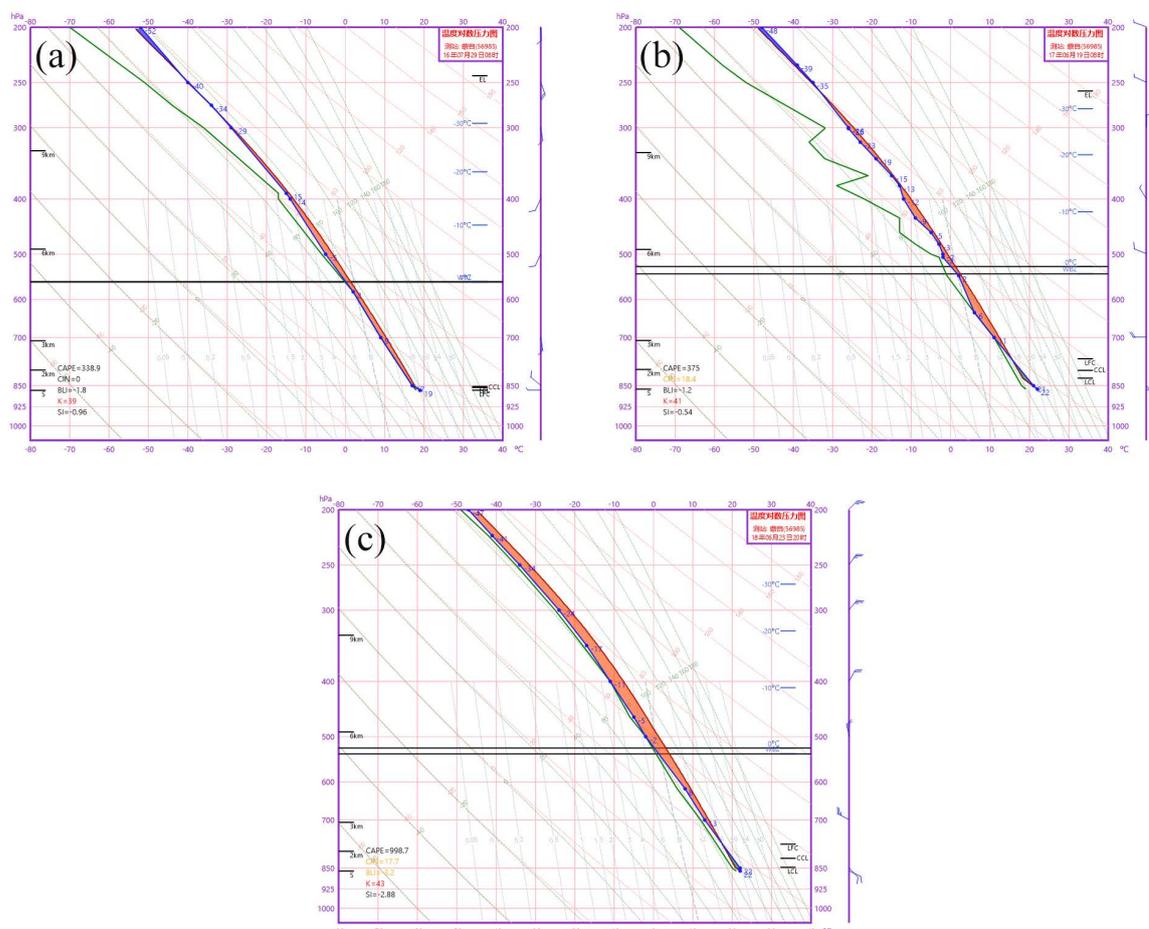
**图 4.** ERA5 再分析资料 700 hPa 风场(矢量, 填色为 12 m/s 以上风速, 单位: m/s)、温度场(红色等值线, 单位:  $^{\circ}\text{C}$ )和位势高度场(蓝色等值线, 单位: dagpm)分布。2016 年 7 月: (a) 28 日 08 时, (b) 29 日 08 时; 2017 年 6 月: (c) 19 日 08 时, (d) 19 日 20 时; 2018 年 6 月: (e) 23 日 20 时, (f) 24 日 08 时

### 3.3. 探空分析

分析个例 1 中蒙自探空站 29 日 08 时 T-lnP 图可知(图 5(a)), 温度露点差小, 水汽条件好, 大气湿层深厚, 500 hPa 以下大气近似饱和。抬升凝结高度低接近地面, CAPE 值为 338.9 J/Kg, CIN 为 0 J/Kg, 说明完全不需要克服外力就可以自由对流, K 指数较大为 39 $^{\circ}\text{C}$ , SI 指数  $< 0^{\circ}\text{C}$ , 有利于短时强降水的出现。垂直风切变较小, 不利于对流大风出现。

分析个例 2 中蒙自探空站 19 日 08 时 T-lnP 图可知(图 5(b)), 大气湿层深厚, 600 hPa 以下大气近似饱和, 400 hPa 以上有干层。抬升凝结高度约在 820 hPa, CAPE 值为 375 J/Kg, CIN 为 18.4 J/Kg, 说明需要克服一定外力才能实现自由对流, K 指数为 41 $^{\circ}\text{C}$ , SI 指数  $< 0^{\circ}\text{C}$ 。有利于短时强降水和对流大风天气的出现。300 hPa 以下风随高度顺转, 有暖平流, 有利于大气不稳定层结加强, 利于对流天气的发生发展。

分析个例 3 中蒙自探空站 23 日 20 时 T-lnP 图可知(图 5(c)), 大气湿层深厚, 整层大气近似饱和。抬升凝结高度低, 约 850 hPa, CAPE 值为 998.7 J/Kg, CIN 为 17.7 J/Kg, 说明需要克服一定外力实现自由对流。K 指数为 43 $^{\circ}\text{C}$ , SI 指数  $< 0^{\circ}\text{C}$ , 400 hPa 以下风随高度顺转, 有暖平流, 垂直风切变较小。以上条件有利于短时强降水的出现。



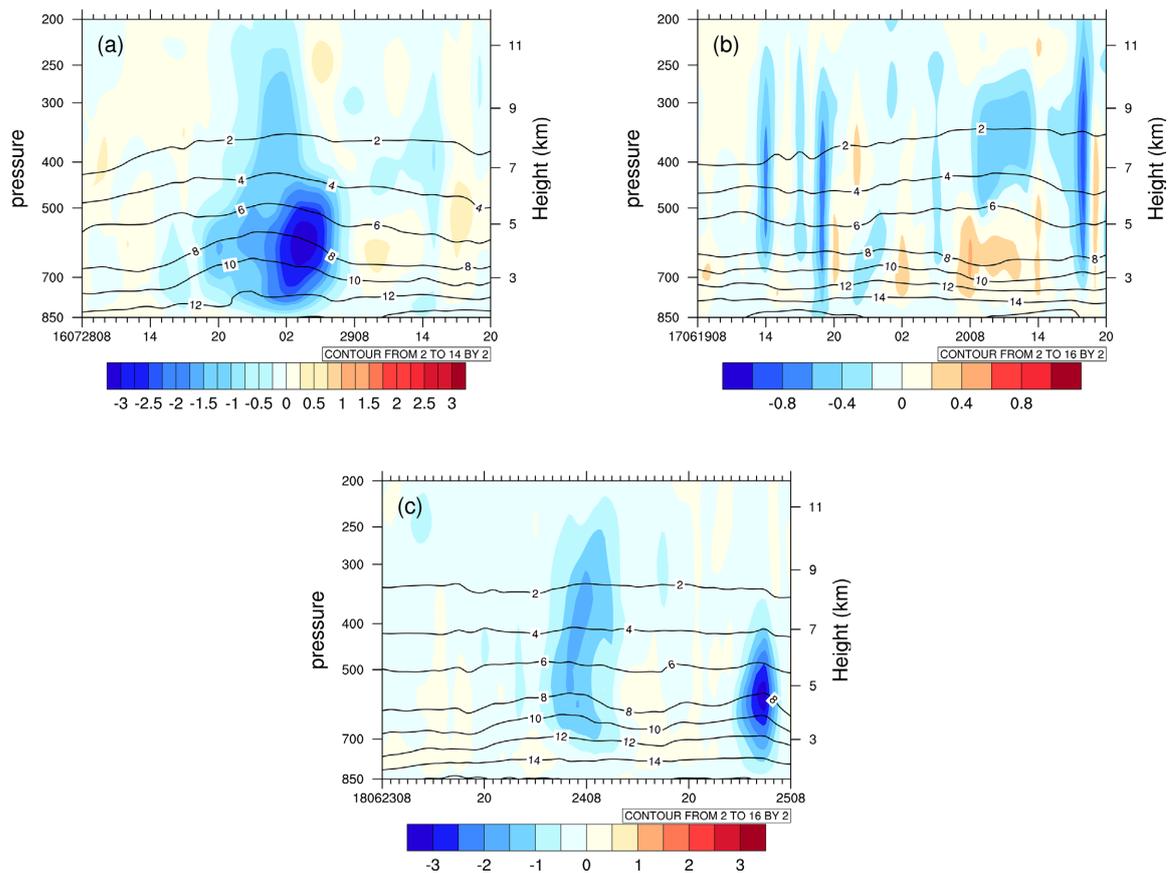
**Figure 5.** Sounding data of Mengzi observe station. (a) 08:00 BST 29 July 2016; (b) 08:00 BST 19 June 2017; (c) 20:00 BST 23 June 2018

**图 5.** 蒙自站探空资料。(a) 2016 年 7 月 29 日 08 时; (b) 2017 年 6 月 19 日 08 时; (c) 2018 年 6 月 23 日 20 时

#### 4. 暴雨成因分析

形成暴雨需要有充足的水汽、强的上升运动和较长的持续时间。水汽条件是暴雨发生的必要条件,如果没有水汽补充,某一局地上空的水汽总量是有限的,要使降水维持,必须有源源不断的水汽输送[8][10]如图 6(a)、图 7(a)、图 8(a)所示,个例 1 中,马关 28 日 08 时~29 日 20 时水汽条件均较好,850 hPa 比湿均超过 12 g/kg,700 hPa 比湿超过 8 g/kg。其中 28 日 21 时~29 日 06 时比湿增强,700 hPa 比湿明显增加,均超过 10 g/kg,28 日 23 时 700 hPa 以下比湿达到最大值。垂直运动方面,28 日 18 时~29 日 08 时马关地区均为上升运动,且垂直上升运动发展高度高,其中 29 日 03 时上升运动最强,绝对值超过 3 Pa/s。29 日 14 时~15 时再次有垂直上升运动发展。分析马关水汽通量散度随时间的变化可见,28 日 20 时~29 日 08 时约 600 hPa 以下有水汽通量辐合,最大超过  $3 \cdot 10^{-7} \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{hPa})$ 。29 日 08 时~29 日 15 时低层约 800 hPa 以下有弱的水汽通量辐合。分析马关地区该次暴雨期间的热力条件发现,28 日 08 时~28 日 19 时 700 hPa 以下大气为位势不稳定层结,28 日 20 时~29 日 05 时受台风残余低压影响,为稳定层结,29 日 06 时~29 日 20 时约 600 hPa 以下大气再次转为位势不稳定层结。对应降水发现,29 日 04 时~05 时和 08 时~09 时为主要强降水时间段。04 时~05 时此时受台风残余低压影响,大气稳定层结,但 03 时起水汽和垂直运动条件增强,故降水增强。08 时~09 时低层比湿增强,有一定的垂直上升运动触发位势不稳定,

故降水增强。29日08时~29日09时降水增强，此时的垂直运动和水汽通量散度并未最强，但由于此时大气为不稳定层结，仅需一定的垂直运动触发不稳定，形成对流降水。



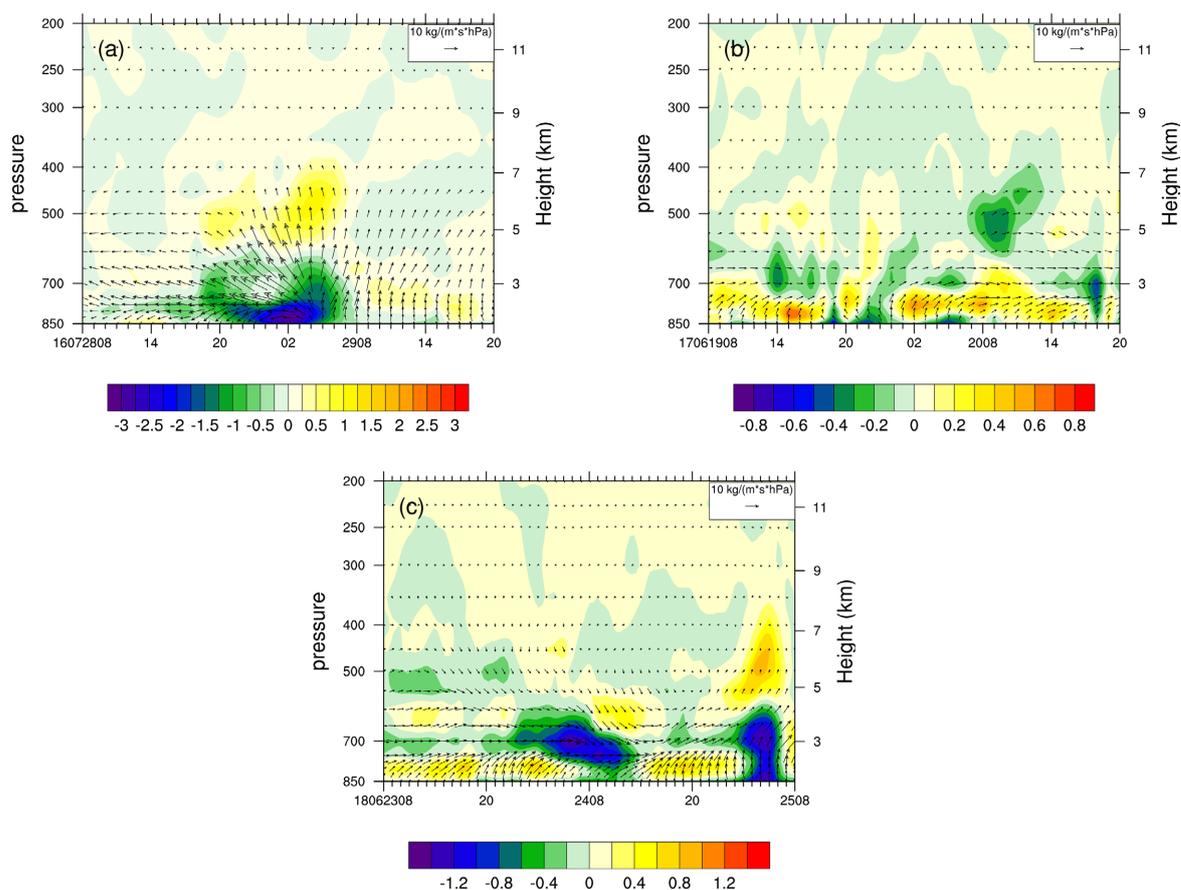
**Figure 6.** Temporal evolution of specific humidity (contours, unit: g/kg) and vertical velocity (shaded, unit: Pa/s) at different heights of Maguan observe station. (a) Case 1; (b) Case 2; (c) Case 3

**图 6.** 马关站不同高度比湿(等值线, 单位: g/kg)、垂直运动(阴影, 单位: Pa/s)随时间的演变。(a) 个例 1; (b) 个例 2; (c) 个例 3

如图 6(b)、图 7(b)、图 8(b)所示, 个例 2 中, 过程期间 850 hPa 比湿超过 14 g/kg, 700 hPa 比湿超过 10 g/kg, 其中 19 日 12 时~20 时和 20 日 10 时~17 时 850 hPa 比湿超过 16 g/kg。垂直运动方面, 19 日 13 时~15 时、19 日 18 时~20 时和 20 日 17 时~18 时有较明显的垂直运动, 其中 19 日 18 时~20 时最强上升运动超过 0.9 Pa/s, 且低层至高层均为上升运动; 20 日 17 时~18 时垂直运动也较强, 但 700 hPa 以下为弱的上升运动, 不利于触发位势不稳定。分析马关水汽通量散度随时间的变化可见, 19 日 18 时~20 时、19 日 21 时~24 时和 20 日 18 时低层有较明显的水汽通量辐合。热力条件方面, 19 日 08 时~22 日 20 时马关 600 hPa 以下均为位势不稳定, 有一定的强对流潜势, 且午后低层增温增湿后大气位势不稳定性增强。700 hPa 以下西南气流为主, 有利于向暴雨区输送水汽。由于水汽通量散度和垂直上升运动均在 19 日 18 时前后最强, 触发位势不稳定, 故 18 时降水最强。

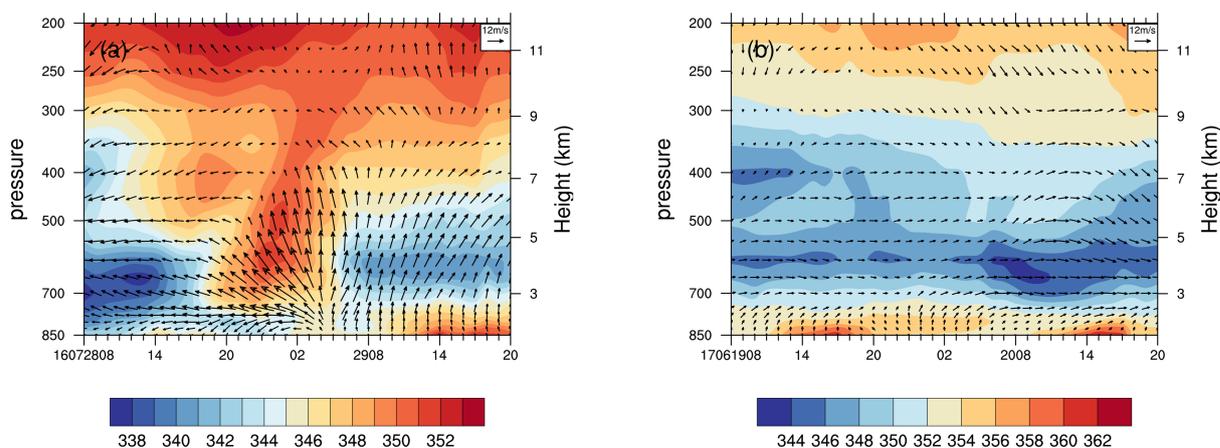
如图 6(c)、图 7(c)、图 8(c)所示, 个例 3 中, 过程期间 850 hPa 比湿超过 14 g/kg, 700 hPa 比湿超过 10 g/kg。24 日 04 时~12 时、25 日 00 时~07 时马关受上升运动影响, 且垂直运动层深厚, 最大上升速度超过 3 Pa/s, 出现在 25 日 05 时。分析马关水汽通量散度随时间的变化可见, 24 日 04 时~14 时和 25 日 02 时~06 时马关地区均有水汽通量辐合, 且 24 日 02 时和 25 日 04 时前后水汽通量辐合强, 且高度高,

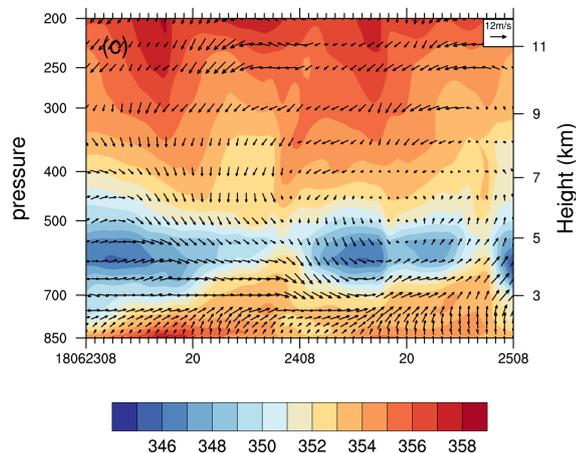
辐合层最大高度超过 700 hPa。热力条件方面, 700~500 hPa 有弱冷空气影响, 假相当位温低, 23 日 08 时~25 日 08 时马关地区均为位势不稳定层结或者中性层结, 其中 24 日 06 时和 25 日 05 时稳定度略有增强。结合降水随时间的演变可见, 24 日 08 时~09 时降水增强, 对应低层水汽通量辐合增强和垂直运动增强, 且水汽和垂直运动增强较降水增强提前 2 小时左右。



**Figure 7.** Temporal evolution of moisture flux (vectors, unit:  $\text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s}\cdot\text{hPa})$ ) and moisture flux divergence (shaded, unit:  $10^{-7} \text{kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s}\cdot\text{hPa})$ ) at different heights of Maguan observe station. (a) Case 1; (b) Case 2; (c) Case 3

**图 7.** 马关站不同高度水汽通量(矢量, 单位:  $\text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s}\cdot\text{hPa})$ )和水汽通量散度(阴影, 单位:  $10^{-7} \text{kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s}\cdot\text{hPa})$ )随时间的演变。(a) 个例 1; (b) 个例 2; (c) 个例 3





**Figure 8.** Temporal evolution of horizontal wind field (vectors, unit: m/s) and pseudo-equivalent potential temperature (shaded, unit: K) at different heights of Maguan observe station. (a) Case 1; (b) Case 2; (c) Case 3

**图 8.** 马关站不同高度水平风场(矢量, 单位: m/s)和假相当位温(阴影, 单位: K)随时间的演变。(a) 个例 1; (b) 个例 2; (c) 个例 3

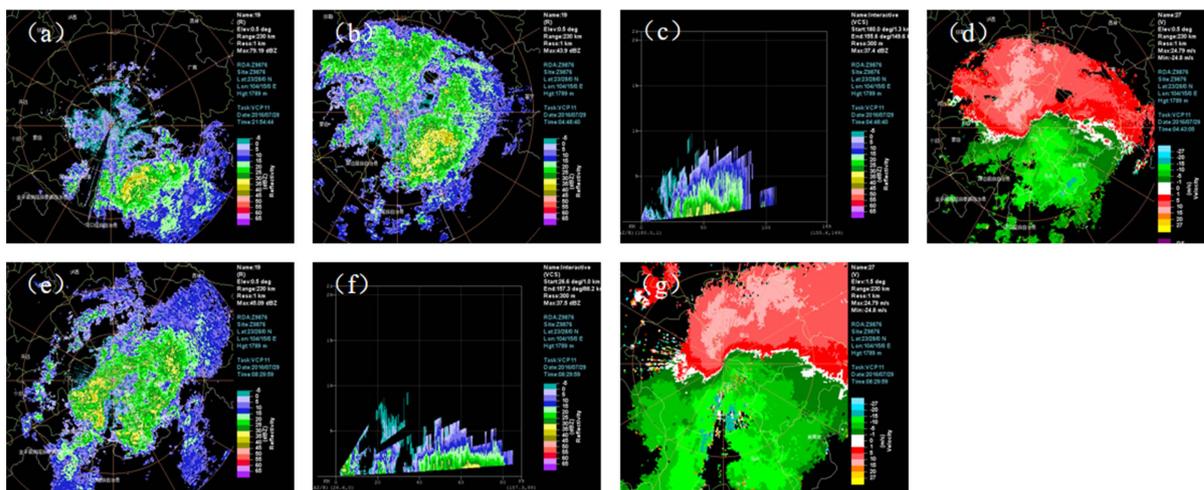
个例 1 和个例 3 降水的水汽, 上升运动条件较个例 2 好, 但降水最大小时雨强弱于个例 2。个例 2 中 19 日午后低层升温, 中层有弱的冷空气影响, 大气不稳定性增强。14 时起马关基本受上升运动控制, 18 时触发位势不稳定, 降水增强。综合以上分析可见, 降水受水汽、垂直运动加强而加强[4], 且水汽和垂直运动增强可较降水增强提前 1~2 小时。另外, 位势不稳定触发也可增强降水。

## 5. 雷达特征分析

个例 1 中, 0.5°仰角反射率因子雷达回波显示(图 9), 28 日 21:54 显示上游大片降水回波将影响马关地区, 回波结构紧凑, 最大值超过 40 dBZ, 说明有一定对流性。之后回波后向发展, 向西北移动并伴有旋转, 持续经过马关, 形成列车效应, 造成马关地区长时间降水。29 日 04:48 强回波呈块状影响马关 - 麻栗坡一带, 反射率因子最大超过 40 dBZ, 过雷达中心点和文山做垂直剖面可见, 回波质心低。径向速度图显示, 速度零线呈“S”形, 说明有暖平流, 有利于降水的发展和维持。29 日 8:29 文山地区受两条带状回波影响, 其中一条经过文山, 回波向东北方向移动, 伴有后向发展, 造成降水持续时间长。过雷达中心点和文山做垂直剖面可见, 降水回波质心较低, 降水效率高。该时刻径向速度图上显示“S”形, 说明有暖平流, 暖平流有利于降水的维持。

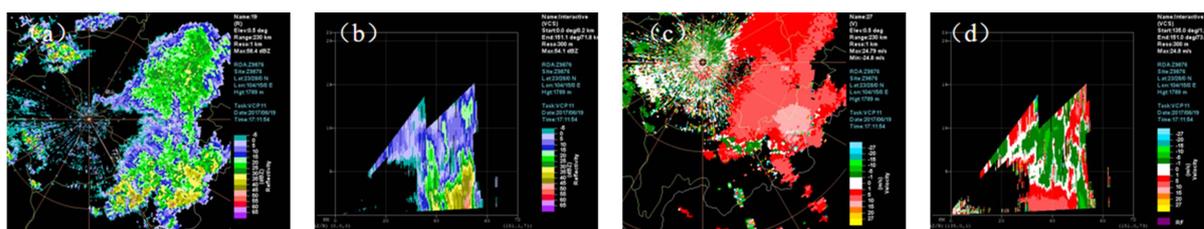
个例 2 中(图 10), 午后文山西北部有分散性的对流回波出现, 并向东南方向移动, 13:00 回波经过文山雷达并有组织加强向文山移动, 由于马关对流条件较好, 回波东移南下至马关加强。19 日 17:11 回波显示, 马关东部回波呈块状, 中心强度超过 50 dBZ。过强中心和雷达中心点做垂直剖面可见, 马关回波发展高度较高, 15 dBZ 回波伸展至 7~8 km 高度, 且 45 dBZ 区发展高度高。径向速度图上显示, 马关东部有径向速度辐合, 垂直剖面图上也可见速度辐合区, 且辐合层厚度厚, 超过 5 km。后期上游仍有分散回波移入, 马关降水强度减弱, 但持续时间长。

个例 3 中(图 11), 24 日 08:20 文山大部分地区受大范围层状降水回波影响, 回波强度最大超过 40 dBZ, 降水回波东移或西移南压, 且上游不断有回波新生, 形成列车效应, 持续影响马关, 造成马关地区降水持续, 达到暴雨。过马关附近强中心和雷达中心点做垂直剖面可见, 回波影响范围大, 有多个中心, 质心高度低, 最大伸展高度约 5 km。径向速度图上显示, 马关地区有风场的切变, 有利于降水回波移入或加强。



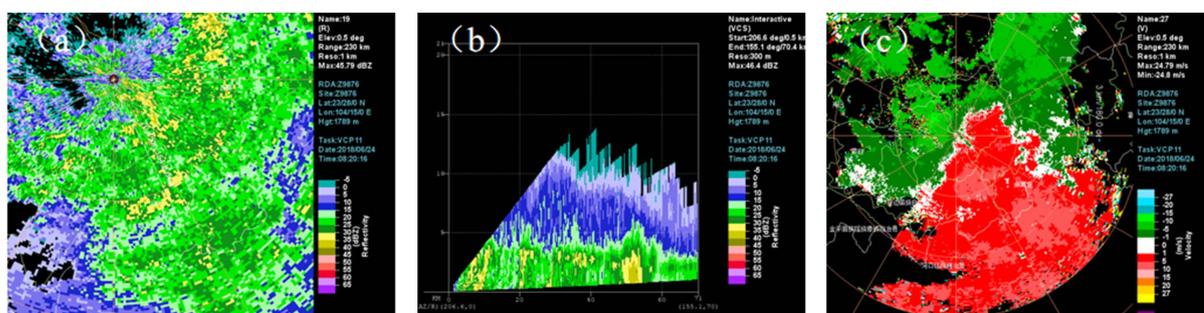
**Figure 9.** Radar reflectivity (unit: dBZ) and radial velocity (unit: m/s) of Wenshan station at  $0.5^\circ$  elevation angle. 2016 July: (a) Reflectivity at 21:54 BST 28 July; (b) Reflectivity at 04:48 BST 29 July; (c) Vertical cross-section of reflectivity along the white line in panel (b) (the same below); (d) Radial velocity at 04:48 BST 29 July; (e) Reflectivity at 08:29 BST 29 July; (f) Vertical cross-section of reflectivity at 08:29 BST 29 July; (g) Radial velocity at 08:29 BST 29 July

**图 9.** 文山站雷达反射率因子(单位: dBZ)和径向速度图(单位: m/s)。 $0.5^\circ$ 仰角 2016 年 7 月(a) 28 日 21:54 反射率因子; (b) 29 日 04:48 反射率因子; (c) 29 日 04:48 过图(b)中白色线条(下同)反射率因子垂直剖面; (d) 29 日 04:48 径向速度; (e) 29 日 8:29 反射率因子; (f) 29 日 8:29 反射率因子垂直剖面; (g) 29 日 08:29 径向速度



**Figure 10.** Same as Figure 9, but for  $0.5^\circ$  elevation angle at 17:11 BST 19 June 2017. (a) Reflectivity; (b) Vertical cross-section of reflectivity; (c) Radial velocity; (d) Vertical cross-section of radial velocity

**图 10.** 同图 9, 但为  $0.5^\circ$  仰角 2017 年 6 月 19 日 17:11。(a) 反射率因子; (b) 反射率因子垂直剖面; (c) 径向速度; (d) 径向速度垂直剖面



**Figure 11.** Same as Figure 9, but for  $0.5^\circ$  elevation angle at 08:20 BST 24 June 2018. (a) Reflectivity; (b) Vertical cross-section of reflectivity; (c) Radial velocity

**图 11.** 同图 9, 但为  $0.5^\circ$  仰角 2018 年 6 月 24 日 08:20。(a) 反射率因子; (b) 反射率因子垂直剖面; (c) 径向速度

综合以上分析可见, 个例 1 和个例 3 中雷达特征显示降水以层状云降水为主, 回波强度在 25~35 dBZ 之间, 质心高度低, 低于 5 km, 径向速度场有暖平流特征或风向切变特征, 有利于降水的持续。个例 2 中降水具有一定的对流性, 回波强度最大超过 50 dBZ, 回波质心高度较高, 约达 7~8 km, 径向速度场显

示有中尺度的辐合,垂直剖面可见辐合层厚度较厚,超过 5 km,强的中尺度辐合提供了较好的动力条件,有利于触发和加强对流。

## 6. 结论

本文利用 ERA5  $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$  逐小时的再分析资料、Micaps 国家站和自动站气象要素资料、文山雷达资料等,对马关地区三次不同背景下的暴雨过程天气背景、成因及雷达特征进行了分析,以提升马关地区暴雨预报准确率。结论如下:

分析形势场发现,个例 1 中马关 500 hPa 位于两高之间均压场,引导气流弱,残余台风低压移入后,在马关附近打转,后期减弱,向东北方向移去,影响时间长。个例 2 中 500 hPa 位于 588 dagpm 和 584 dagpm 之间,有短波槽影响,中高纬冷空气渗透,短波槽加深;700 hPa 受低涡底部切变线影响。个例 3 中 500 hPa 位于两高之间,有高原涡影响,并伴有短波槽东移;700 hPa 有低涡切变影响,由于副高增强,阻挡短波槽东移。以上形势均有利于马关地区长时间受上升气流影响,有利于长时间降水。

分析探空可见,三次个例中马关地区均有一定的对流能量,对流抑制小,抬升凝结高度低,K 指数在  $40^{\circ}\text{C}$  附近,SI 指数  $<0^{\circ}\text{C}$ 。个例 1 和个例 3 湿层深厚,有利于短时强降水的出现,个例 2 中 400 hPa 有干冷空气侵入有利于出现短时强降水和大风。

分析暴雨成因,三次过程比湿条件均较好,个例 1 中,850 hPa 超过 12 g/kg,700 hPa 超过 8 g/kg。个例 2 和个例 3 中,850 hPa 超过 14 g/kg,700 hPa 超过 10 g/kg。三次过程期间均伴有水汽通量散度辐合,个例 1 辐合强度最强,个例 2 和个例 3 辐合相对较弱。三次过程均有上升运动,个例 1 和个例 3 中上升运动强,且持续时间长,最大超过 3 Pa/s;个例 2 中低层以弱的上升运动为主,部分时刻上升运动增强,超过 0.8 Pa/s。降水受水汽、垂直运动加强而加强,且水汽和垂直运动增强可较降水增强提前 1~2 小时。另外,位势不稳定触发也可增强降水。

分析雷达演变特征可见,个例 1 和个例 2 以层状云降水为主,最大反射率因子超过 40 dBZ。马关地区持续受回波影响,形成列车效应。从垂直剖面可见,回波质心低。径向速度特征上,个例 1 中有“S”形特征,说明有暖平流;个例 3 中有风场的切变。个例 2 中最强时段降水有对流性,19 日 17:11 回波呈块状,中心强度超过 50 dBZ。垂直剖面图上,马关回波发展高度较高,可伸展至 7~8 km 高度。径向速度图上有速度辐合,辐合层厚度超过 5 km。

## 基金项目

文山州气象局 2023 年科研项目(WSZL202319)。

## 参考文献

- [1] 马志敏,杨素南,王治国,等. 云南局地暴雨分型研究[J]. 云南大学学报(自然科学版), 2020, 42(1): 108-118.
- [2] 许美玲,段旭,纪明辉,等. 云南省天气预报员手册[M]. 北京: 气象出版社, 2011.
- [3] 郭荣芬,肖子牛,陈小华,等. 两次西行热带气旋影响云南降水对比分析[J]. 应用气象学报, 2010, 21(3): 318-328.
- [4] 董兴欣,冯德华,李林. 云南文山一次低涡暴雨成因初探[J]. 云南地理环境研究, 2020, 32(1): 71-76.
- [5] 马志敏,朱莉,连钰,等. 云南两次局地暴雨过程水汽输送特征分析[J]. 中低纬山地气象, 2021, 45(6): 50-59.
- [6] 黄慧君,郑建萌,马涛,等. 夏季高原低涡切变影响下云南大雨暴雨的分布及成因研究[J]. 高原气象, 2023, 42(2): 403-416.
- [7] 李国平,张万诚. 高原低涡、切变线暴雨研究新进展[J]. 暴雨灾害, 2019, 38(5): 464-471.
- [8] 杨芳园,潘娅婷,邹灵宇,等. 昆明市两次局地短时暴雨过程对比分析[J]. 云南大学学报(自然科学版), 2021, 43(5): 953-963.

- 
- [9] 张思豆, 张腾飞, 曹杰. 云南 2 次西行台风暴雨过程数值模拟和诊断分析[J]. 云南大学学报(自然科学版), 2017, 39(6): 1012-1022.
- [10] 朱乾根, 林景瑞, 寿绍文, 等. 天气学原理和方法[M]. 北京: 气象出版社, 2007.