

李永军,徐金波,李玄,等.2024.四川南部一次局地暖区暴雨中尺度特征及成因[J].大气科学,X(Y):Y1-Y2.LI Yongjun,Xu Jinbo,LI Xuan,et al.2023.Mesoscale characteristics and causes of a local warm area rainstorm in southern Sichuan Province[J].Chinese Journal of Atmospheric Sciences,X(Y):Y1-Y2(in Chinese).doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2404.23096

四川南部一次局地暖区暴雨中尺度特征及成因

李永军^{1,2,3} 徐金波^{1,2,3} 李玄^{1,2,3} 何科^{1,2,3} 严晶^{1,2,3} 资晶^{1,2,3} 卢萍^{3,4}

1 攀枝花市气象台, 攀枝花 617000

2 攀枝花市气象局暴雨创新团队, 攀枝花 617000

3 高原与盆地暴雨旱涝灾害四川省重点实验室, 成都 610072

4 中国气象局成都高原气象研究所, 成都 610072

摘要 本文利用地面自动气象站逐时降水资料、多源融合逐时气温资料、高空观测资料、FY-4A 气象卫星资料、X 波段双偏振雷达资料和 ERA5 再分析资料,对四川省南部攀西地区 2022 年 10 月 4 日 20 时-5 日 12 时的局地暖区暴雨过程中尺度特征及成因进行分析,结果表明:(1)在卫星云图上,此次暴雨天气过程为 β - γ 中尺度对流系统,择木龙村一带中尺度对流系统三次经历了发展-加强-减弱的过程。暴雨中尺度对流系统自下而上向东倾斜,使得对流系统得以较长时间的维持和发展。(2)在雷达回波上,择木龙村一带回波呈带状分布,表现出明显的后向传播特征,“列车效应”显著,较强回波质心较低,多在 4.5km 以下,其单体质心减弱十分迅速,表明其具有较高的降水效率。(3)此次暴雨天气过程大气层结呈现典型的位势不稳定层结结构,对流凝结高度、抬升凝结高度和自由对流高度较低,使得气块不需要太强的抬升作用就能产生垂直上升运动和水汽凝结,使雷暴系统迅速发展。垂直风切变较弱,降低了未饱和干冷空气的卷入,减弱夹卷率,提高了降水效率。(4)攀枝花西北部边缘地形的阻挡作用形成的辐合流场和气旋式流场是该地不断有对流生成,形成“列车效应”,造成择木龙村一带出现极端降水的主要原因。而观音堂村一带,西南低空急流与其东北部山脉接近正交,地形能强迫气流抬升,在山前的低洼地带形成了较强降水。西南低空急流和由于地形作用形成的风速辐合,地形温度梯度造成的地形环流也对暴雨的形成起到促进作用。

关键词 攀西地区 暖区暴雨 中尺度特征 成因分析 地形作用

文章编号 中图分类号 P426.61+4 文献标识码 A

doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2404.23096

Mesoscale Characteristics and Causes of a Local Warm-sector Rainstorm Process in Southern Sichuan

LI Yongjun^{1,2,3} XU Jinbo^{1,2,3} LI Xuan^{1,2,3} HE Ke^{1,2,3} YAN Jing^{1,2,3} ZI Jing^{1,2,3} LU Ping^{3,4}

1 Panzihua Meteorological Observatory, Panzihua 61700

2 Rainstorm Innovation Team of Panzihua Meteorological Bureau, Panzihua 61700

收稿日期 2023-07-11; 网络预出版日期 XXXX-XX-XX

作者简介 李永军,男,1988 年出生,学士,高级工程师,主要从事天气气候预报研究。E-mail: leeyj0918@163.com

资助项目 高原与盆地暴雨旱涝灾害四川省重点实验室项目 SCQXKJYJXMS202306,攀枝花市指导性科技计划项目 2022ZD-S-6,四川省自然科学基金项目 2022NSFSC0021,科技部国家重点研发计划 2022YFC3003902

Funded by Heavy Rain and Drought-Flood Disasters in Plateau and Basin Key Laboratory of Sichuan Province(Grant SCQXKJYJXMS202306),Panzihua Guiding Science and Technology Plan Project(Grant 2022ZD-S-6),Sichuan Natural Science Foundation Project of Sichuan Province(Grant 2022NSFSC0021),National Key R&D Plan of the Ministry of Science and Technology(Grant 2022YFC3003902)

Abstract Based on the hourly precipitation data from automatic weather stations, hourly temperature data from multi-source fusion, high-altitude observation data, meteorological satellite data of FY-4A, X-band dual polarization radar data and ERA5 reanalysis data, the mesoscale characteristics and causes of a warm-sector rainstorm process in Panxi area, southern Sichuan from 20:00 on October 4th, 2022 to 12:00 on October 5th, 2022 is analyzed. The results show that: (1) This process manifested as a β - γ mesoscale convective system on satellite imagery, which has gone through three stages of developing, strengthening and weakening in Zemulong Village area. The mesoscale convective system of rainstorm tilts east from bottom to top, allowing the convective system to maintain and develop for a longer period. (2) The radar echo in Zemulong Village area shows a strip-shaped distribution, the back-propagation and echo training effects is significant. The strong echo nuclei is relatively low, mostly below 4.5km and its individual nuclei weakens rapidly, thus it has a high precipitation efficiency. (3) In this process, the atmosphere is in an unstable state of dryness above and wetness below, with a low level of CCL, LCL, LFC, thus the gas mass does not need to be lifted too strongly to move upward vertically and cause water vapor condensation, then the thunderstorm system can develop rapidly. The weak vertical wind shear also reduces the involvement of unsaturated dry cold air, weakens the entrainment rate and improves the precipitation efficiency. (4) The convergence and cyclonic flow field formed by the blocking effect of the terrain on the northwest edge of Panzhihua are the main factors generating the continuous convection and forming the training effects, thus extreme precipitation occurs in Zemulong Village area. In Guanyintang Village, the southwest low-level jet stream is nearly orthogonal to the northeast mountains, which force the airflow to rise and forming strong precipitation in the low-lying areas in front of the mountain. Due to the southwest low-level jet, convergence of wind speeds caused by terrain, the terrain circulation caused by terrain temperature gradient also promotes the formation of heavy precipitation.

Key words Panxi area, warm-sector rainstorm, mesoscale characteristics, cause analysis, topographic effect

1 引言

强降水是四川省的主要气象灾害,四川省南部的攀西地区(攀枝花市和凉山州)是四川省三个强降水天气发生的高频次区域之一(肖递祥等, 2009),攀西地区以山地为主,强降水天气极易引发山洪、滑坡和泥石流等次生灾害(谭万沛和韩庆玉, 1992; 苏鹏程等, 2006),给当地人民群众的生命财产安全构成了极大的威胁。比如,2016年9月18-19日,攀枝花市仁和区出现暴雨,局地特大暴雨,引发山洪、泥石流等次生灾害,造成9人死亡,8人失联;2020年6月26日,凉山州冕宁县北部突降暴雨至特大暴雨,造成22人死亡或失踪(齐铎等, 2023)。据统计2002-2020年,攀西地区因强降雨造成的死亡人数达289人(高洁等, 2022)。

暖区暴雨的概念最早由黄士松(1986)针对华南前汛期暴雨提出,研究表明这种暴雨具有雨强大、雨量相对集中、范围小、突发性强等一些特点(黄士松, 1986; 林良勋, 2006),斜压性强迫不明显,常常与副高、急流等密切相关,具备丰富的水汽输送,并且边界层触发机制复杂,经常受到地形的影响。一般发生在低层暖湿舌中,具备高温、高湿的环境条件,对流有效位能大,对流抑制能量小,高空辐散强,一般与暖湿气流内部的不稳定有关(程正欣和包澄澜, 1990; 陈静等, 2003; 林良勋, 2006; 夏茹娣等, 2006; Wang et al., 2014; 何立富等, 2016; Du and Chen (2018, 2019); 刘瑞鑫等 2019; 刘瑞鑫等 2021)。除华南地区外,我国其他地区也受到暖区暴雨的严重影响(孙继松等, 2012; 徐珺等, 2014; 孙建华等, 2013; 周明飞等, 2014; zhong et al., 2015; 陈云辉等, 2015; 孔凡超等, 2016; 段伯隆等, 2017)。四川南部的攀西地区,由于其地形地貌复杂,局地突发性暖区暴雨频发。

暖区暴雨影响系统相对于锋面暴雨不明显,预报信号较弱,数值预报模式难以很好描述暖区对流的发生发展(Luo et al., 2016; Hang and Luo, 2017; 谌芸等, 2018; 覃武等, 2020),暖区暴雨触发、发生、发展和维持等机理十分复杂,且在各个区域体现不尽相同(方翀等, 2012; 宗志平等, 2013; 王淑莉等, 2015),因而揭示不同区域暖区暴雨的降水特点、中尺度特征和形成原因具有重要意义,前人对不同地区暖区暴雨开展了大量研究,很有参考借鉴意义。谌芸等(2012)和孙军等(2012)对2012年

北京“7.21”特大暴雨的极端性进行分析表明,降水过程由暖区降水和锋面降水组成,暖区降水开始时间早、强度大、中心较为分散、持续时间长,且降水大部分是由地形触发对流单体并形成准静止线性 MCS 而造成。雷蕾等(2020)对 2018 年北京“7.16”暖区特大暴雨进行了分析研究,揭示了低空急流在暖区暴雨发生发展中的动力、热力作用,同时指出了地面辐合线是触发雷暴并形成对流的重要因素,地形对对流触发和暴雨的增幅有重要影响。张家国等(2015)分析了 2012 年 7 月 12-13 日鄂东北连续暖区特大暴雨,指出此次暴雨是由一个向后传播-准静态 α 中尺度强对流系统产生的,与鄂东北东侧大别山脉对雷暴冷池的阻挡有密切关系。向后传播方式演变的中尺度对流系统因少动或因“列车效应”明显,常在山前一定距离内产生极端强降水。李琴和邓承之(2021)对重庆 2019 年 4 月 19 日极端强降水进行分析,表明了河谷冷池和暖区间的强水平温度梯度有利于近地面西南风增速并在山前辐合抬升,促使对流快速发展,近地面中尺度风场辐合线可促进中尺度对流系统的发展。国外于 20 世纪 70 年代开始建设多普勒雷达天气观测网,因此对于暖季 MCS 开展研究较早。Blustein 等(1987)、Moore 等(2003)对 MCS 的分类、组织模型和环境特征进行了大量统计分析, Parker 等(2000)重点对 TS, LS, PS 型线状对流系统的发展过程与环境场垂直切变特征的关系。Doswell 等(1996)研究表明 MCS 组织结构、移动方向对降水落区及强度有重要影响,当多个线状排列的雷暴单体线状排列形成“列车效应”(Echo Training Effects)时,能够形成局地较高的降雨量。Schumacher 等(2005)对形成美国中西部暴雨的 MCS 组织结构区分为 Training line or adjoining stratiform(TL/AS)与 Back-Building(BB)两种组织结构,并分析了两类 MCS 的对应环境特征。对于四川地区的暖区暴雨,目前研究主要集中在四川盆地。肖红茹等(2021)给出四川盆地暖区暴雨的定义,并根据天气形势和影响系统将其分为西南涡型、副热带高压边缘型、西南低空急流型和东南风型四类,并统计分析四类暖区暴雨的时空分布特征和降水性质。周长春等(2015)、杨康权等(2017,2019)对盆地西部暖区暴雨的个例分析发现,盆地暖区暴雨具有强度大、对流强、多发生于夜间的特点,且大多出现在龙门山脉一线,与地形关系密切。付智龙等(2022)对 2017 年 7 月 23 日发生在四川盆地西部的一次暖区山地暴雨事件进行数值模拟试验,指出此次暖区山地暴雨本质上是由山地与平原的热力差异驱动的。

攀西地区位于青藏高原东南缘,其雨季大气同时具有较大感热通量和潜热通量(Chen et al.,2015;吕艺影等, 2018),致使该区域对流频繁而强烈,同时该区域地形地貌复杂,极易引发强对流天气,暖区强降水发生频率极高,但目前研究仍属空白。本文利用地面自动气象站逐时降水资料、多源融合逐时气温资料、高空观测资料、FY-4A 气象卫星资料、X 波段双偏振雷达资料和 ERA5 再分析资料,对四川省南部攀西地区 2022 年 10 月 4 日 20 时-5 日 12 时的暖区局地暴雨过程中尺度特征及形成原因进行分析,以弥补目前研究不足,为今后暖区暴雨预报服务工作提供参考。

2 降水特征和环流背景

2.1 降水特征

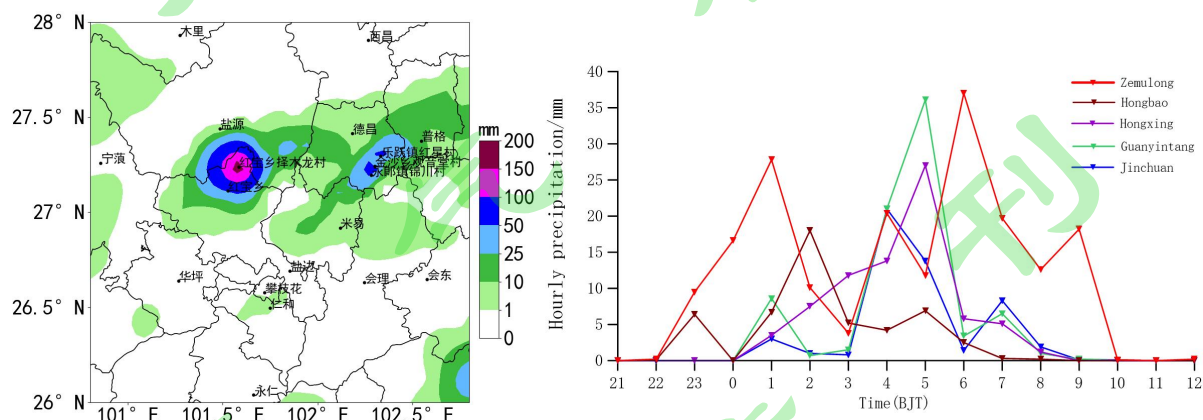


图 1 四川南部攀西地区 2022 年 10 月 4 日 20 时-5 日 12 时降水量分布(a)和暴雨以上站点小时降水量分布(b)

Fig.1 (a)Precipitation distribution and (b)hourly precipitation distribution at stations above rainstorm in Panxi area of southern Sichuan from 20:00 on October 4th,2022 to 12:00 October 5th,2022

图 1(a)为 2022 年 10 月 4 日 20 时-5 日 12 时(北京时,下同)降水量分布,2022 年 10 月 4 日 20 时-5 日 12 时,四川南部攀西地区出现了一次局地暴雨天气过程,最大降水量出现在红宝乡择木龙村,188.0mm,达大暴雨标准,经统计,2010-2022 年攀枝花市相继建成了 150 余个自动气象站,日雨量(20 时-20 时)超过 180mm 仅有 8 站次,本次降水具有极端性。另外有 4

个暴雨站点,分别为金沙乡观音堂村、乐跃镇红星村、永郎镇锦川村和红宝乡, 降水量分别为 79.1mm、75.8mm、51.3mm 和 50.5mm, 降水主要分为红宝乡择木龙村、红宝乡片区以及金沙乡观音堂村、乐跃镇红星村、永郎镇锦川村片区, 下文把择木龙村和观音堂村分别作为片区代表站点。图 1(b)为暴雨以上站点小时降水量分布, 可见, 降水发生于 2022 年 10 月 4 日 22 时-5 日 10 时, 持续时间较长, 红宝乡择木龙村小时降水分布呈现双峰形态, 主峰值出现在 4 日 06 时, 降水强度达 $37\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$, 还有一个次峰值出现在 5 日 01 时, 降水强度达 $27.8\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 。其余站点小时降水呈现单峰特征, 红宝乡降水峰值出现在 5 日 02 时, 降水强度为 $18\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$, 而另外三个站点降水峰值出现在 5 日 04-05 时, 降水峰值强度在 $21\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$ - $36.1\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 之间。整体看, 降水具有雨强大、雨量相对集中、范围小、突发性强和持续时间较长的特点。

2.2 环流背景

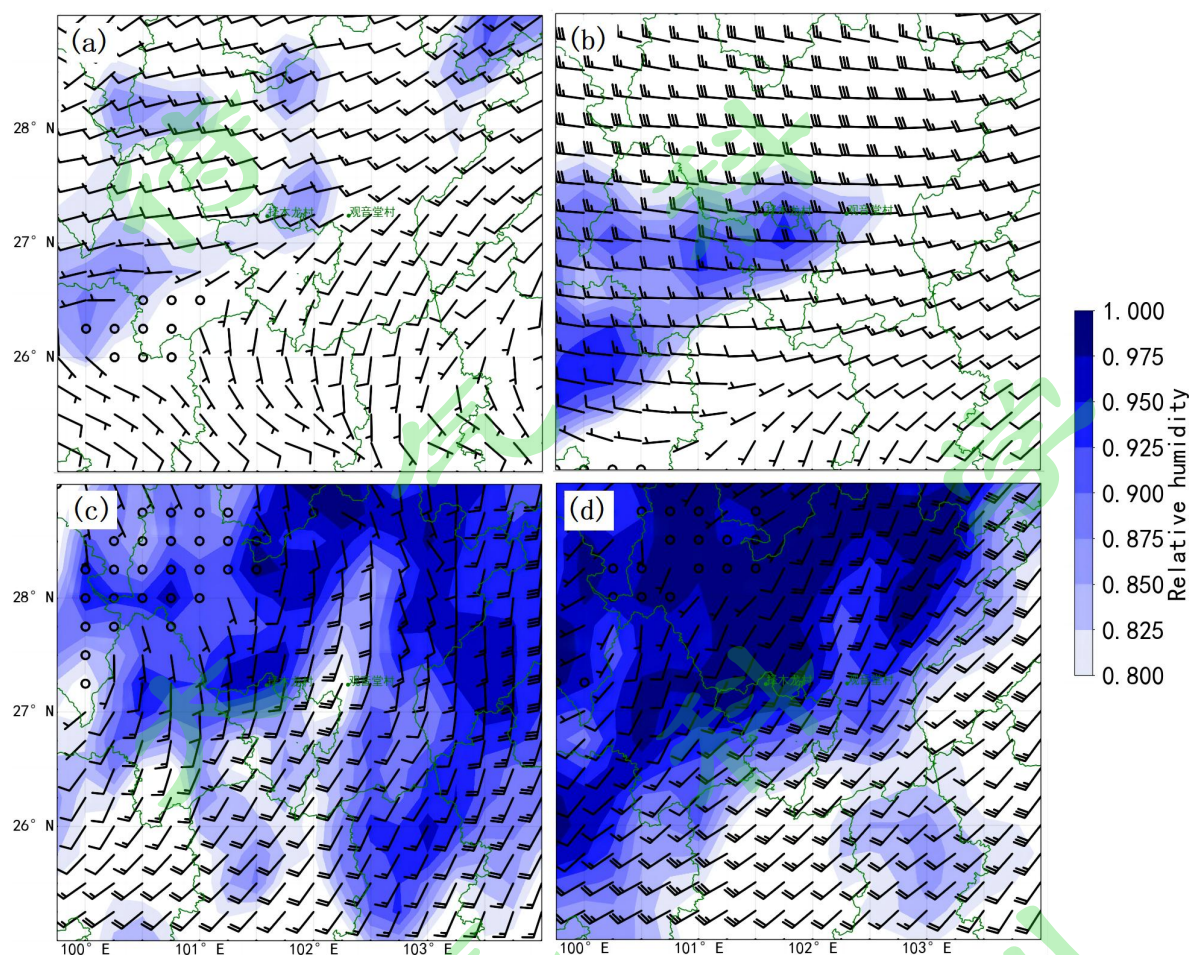


图 2 四川南部攀西地区 2022 年 10 月 4 日 20 时和 5 日 08 时高空形势图(a:4 日 20 时 500hPa, b:5 日 08 时 500hPa, c:4 日 20 时 700hPa, d:5 日 08 时 700hPa。风向杆为风, 单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)

Fig.2 High Altitude Situation Map of Panxi Area in Southern Sichuan from 20:00 on October 4th,2022 to 08:00 on October 5th, 2022 for(a) 500hPa at 20:00 on October 4th, (b) 500hPa at 08:00 on October 5th, (c) 700hPa at 20:00 on October 4th, and(d) 700hPa at 08:00 on October 5th(wind(vector), unit: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)

图 2 为四川南部攀西地区 2022 年 10 月 4 日 20 时和 5 日 08 时高空形势图, 由图可见, 10 月 4 日 20 时,500hPa(图 2a)攀西地区受反气旋环流和偏西气流共同影响, 择木龙村和观音堂村一带位于反气旋北侧偏西气流里, 700hPa(图 2c)攀西地区受西南气流控制, 观音堂村一带西南风达到 $8\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, 择木龙村一带有西南风速的辐合, 相对湿度较大, 在 92.5%-97.5%之间。10 月 5 日 08 时,500hPa(图 2b)反气旋环流较 4 日 20 时有明显东移南压, 择木龙村和观音堂村一带偏西风增强, 达 $10\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, 700hPa(图 2d)西南气流较 4 日 20 时有明显增强, 在观音堂村一带达急流标准(700hPa, $12\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$), 相对湿度在 90%-100%之间。

综合而言, 本次天气过程无明显斜压性天气系统影响和高空冷平流, 高层 500hPa 择木龙村和观音堂村一带位于反气旋北侧偏西气流里, 低层 700hPa 受较一致的西南气流控制, 地面也无冷空气影响(图略)。参照杨康权等(2017)、肖红茹等(2021)

对四川盆地暖区暴雨的定义，将攀西地区无明显地面冷锋和高空冷平流，700hPa 和 500hPa 无明显影响天气系统，降水发生在暖区一侧或暖性低压环流区域中的暴雨定义为暖区暴雨，此次天气过程为局地突发性暖区暴雨天气过程。那么本次暖区局地突发性暴雨的中尺度对流系统有什么特征？形成原因是什么？择木龙村片区和观音堂村片区的中尺度特征及降水成因是否一致？接下来将用地面、高空气象观测资料、雷达卫星资料和 ERA5 再分析资料等开展分析。

3 中尺度对流系统发展演变特征

3.1 卫星云图上中尺度对流系统发展演变特征

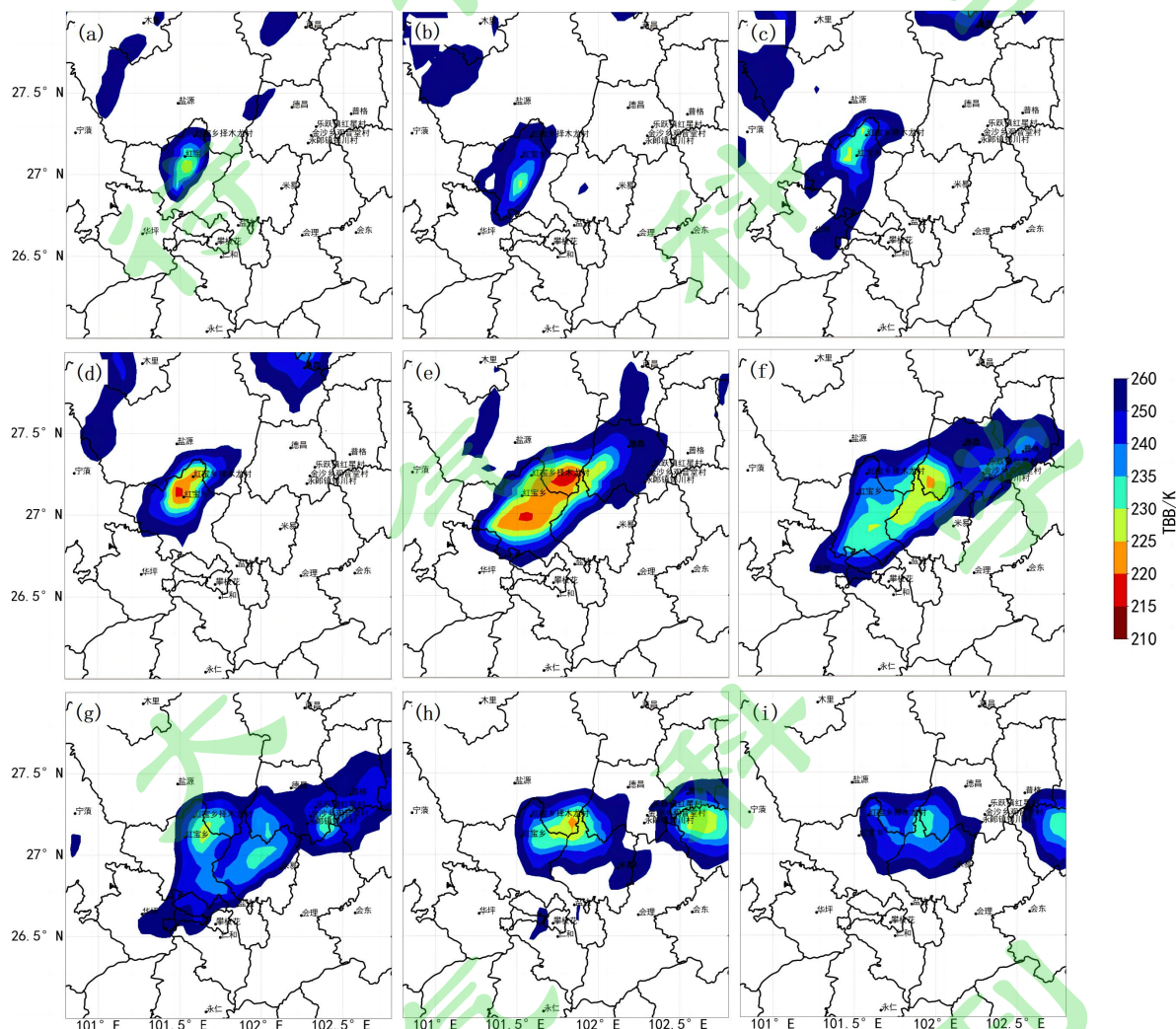


图 3 2022 年 10 月 4-5 日局地暴雨中尺度对流系统相当黑体亮度温度(TBB)分布图(a:4 日 23:30,b:4 日 23:50,c:5 日 00:30,d:5 日 00:53,e:5 日 02:26,f:5 日 03:45,g:5 日 04:23,h:5 日 05:38,i:5 日 06:15)

Fig.3 Distribution Map of Equivalent Blackbody Brightness Temperature (TBB) of Local Heavy Rainfall Mesoscale Convective System from October 4th, 2022 to October 5th, 2022 at (a) 23:30, (b) 23:50, (c) 00:30, (d) 00:53, (e) 02:26, (f) 03:45, (g) 04:23, (h) 05:38, and (i) 06:15

图 3 为 2022 年 10 月 4-5 日暴雨中尺度对流系统相当黑体亮度温度(TBB)分布图，可见中尺度对流系统为 β - γ 中尺度，整体对流并不强，最低黑体亮度温度(TBB)在 215-220K 之间，李永军等(2021)统计分析了 2010-2019 年影响攀西地区南部的 MCC，其大暴雨型、暴雨型和大雨型的相当黑体亮度温度(TBB)可达 181.15-197.15K。

分别从择木龙村片区和观音堂村片区 2 个降水区域分析中尺度对流系统演变。择木龙村一带中尺度对流系统经历了 3 个发展-加强-减弱的过程。第一个发展-加强-减弱过程出现在 4 日 22: 30 左右-23:50，23:30 择木龙村一带上空已经有对流系统形成，之后范围扩大，强中心逐渐南落，择木龙村上空对流减弱。第二个发展-加强-减弱过程出现在 5 日 00:30-03:45,00:30

择木龙村上空对流较 23:50 明显加强，之后逐渐发展，范围扩大，在 02:26 强度达到最大，之后强中心逐渐向东移动，强度有所减弱，这一发展-加强-减弱过程为三个发展-加强-减弱过程中的最强过程，择木龙村和红宝乡的降水峰值也出现在这期间。第三个发展-加强-减弱过程出现在 5 日 04:23-06:15，择木龙村上空对流在上一过程中已明显减弱，但在 04:23 又有显著加强，之后再逐渐加强并向东移动，05:38 达到这一过程最强，之后向东移动，强度有所减弱。

由以上分析可知，择木龙村一带不断有对流发展，并三次经历发展-加强-减弱过程，这也是择木龙村出现极端大暴雨的原因所在。

观音堂村 00:53 还没有出现较强对流系统，02:56 择木龙村一带对流系统范围扩大，强中心向东北延伸至观音堂村一带，05:30 对流达到最强，其降水峰值也出现在这一时段，通过分析可知观音堂村一带降水为择木龙村一带云系发展加强并向东北延伸造成。系统的向东移动，考虑与 500hPa 的环流变化有关，由图 2 分析可知，4 日 20 时至 5 日 08 时，500hPa 择木龙村和观音堂村一带东南侧的反气旋有明显东移南压，择木龙村和观音堂村一带偏西风由 $4\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 增强至 $10\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ，导致了系统的向东移动。故从整体看，此次局地暴雨中尺度对流系统的生成发展的源头在择木龙村一带，分析清楚择木龙村一带对流不断生成、发展和加强的原因，也就可以很好地解释本次局地暴雨的形成原因。

从降雨落区和中尺度对流系统的位置关系看，02:26 之后，中尺度对流系统的高空位置与降雨区有明显的偏移，02:26 降水站点择木龙村和红宝乡并未对应相当黑体亮度温度(TBB)的低值区，而相当黑体亮度温度(TBB)的低值区一带也有很多气象观测站点，但未发生明显降水，说明中尺度对流系统有明显的自下而上向东倾斜，之后时次都有类似的分布特征，其形成原因与中尺度系统向东移动类似，由 500hPa 的环流变化导致。这种倾斜结构，可以减弱降水粒子的拖曳作用对上升气流强度的影响，破坏中尺度对流系统的自毁机制(廖晓农等, 2008;孙继松和陶祖钰, 2012)，使得对流系统得以较长时间的维持和发展。

3.2 雷达回波上中尺度对流系统发展演变特征

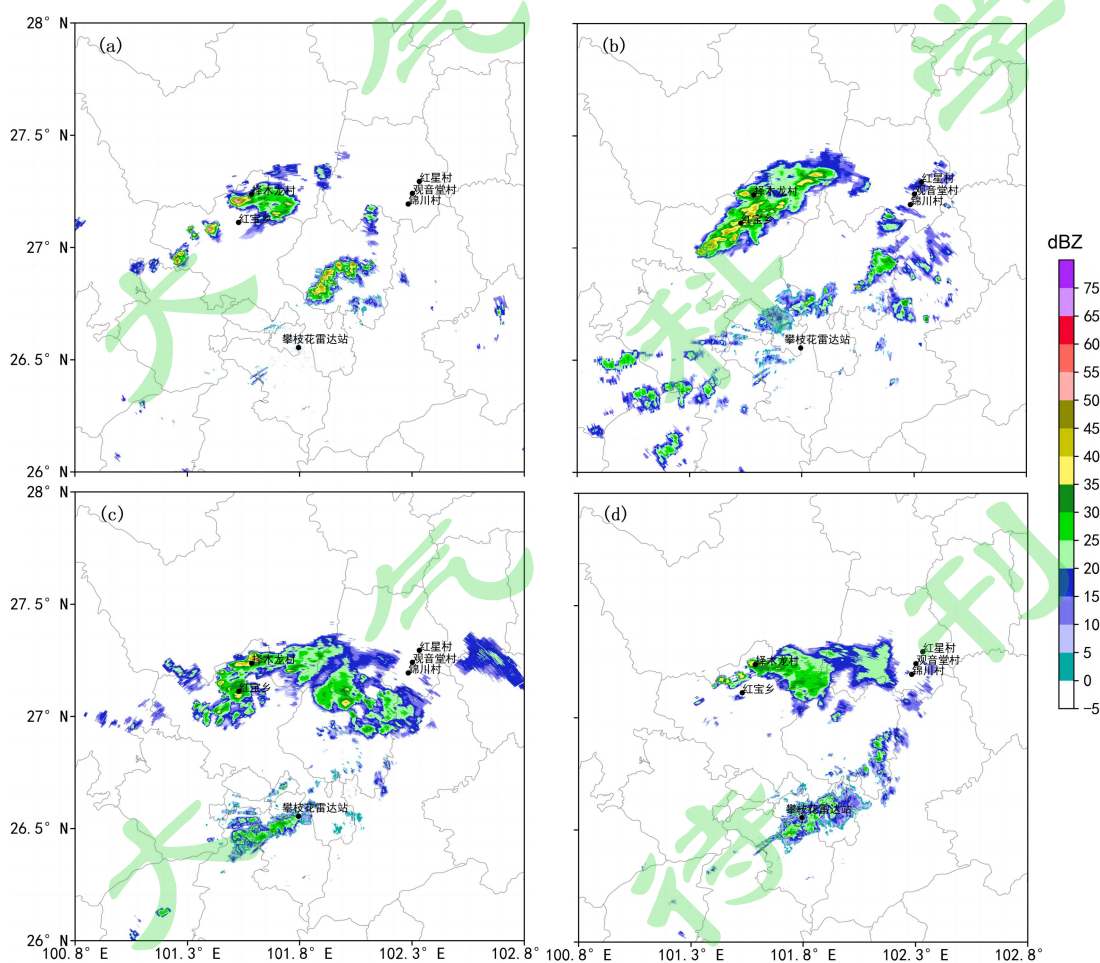


图 4 2022 年 10 月 4-5 日局地暴雨过程攀枝花雷达 2.4°仰角雷达回波图(a:4 日 23:35,b:5 日 01:28,c:5 日 05:37,d:5 日 06:48)
Fig.4 Panzhihua Radar 2.4° Elevation Radar Echo Map of Local Heavy Rainfall Process from October 4th, 2022 to October 5th, 2022

at (a) 23:35 on 4th, (b) 01:28 on 5th, (c) 05:37 on 5th, and (d) 06:48 on 5th

图4为2022年10月4-5日局地暴雨过程攀枝花雷达2.4°仰角雷达回波图,可见,23:35 择木龙村一带已有雷达回波生成,其西南方向还有许多分散的新生回波单体,最大回波强度在55-60dBZ之间,在攀枝花雷达站的东北方向也有部分雷达回波存在。5日01:28,择木龙村一带回波已连成片,形成带状分布,回波强度有所减弱,逐渐向东北方向移动,而攀枝花雷达站东北方向的回波已明显减弱消散。5日05:37、06:38 择木龙村一带回波继续维持,其移动方向的后侧还不断有分散对流回波新生,后向传播特征明显,多个暖区暴雨个例均表现出相似的传播特征(谌芸等, 2012; 陈明轩等, 2013; 徐珺等, 2014; 徐珺等, 2018)。

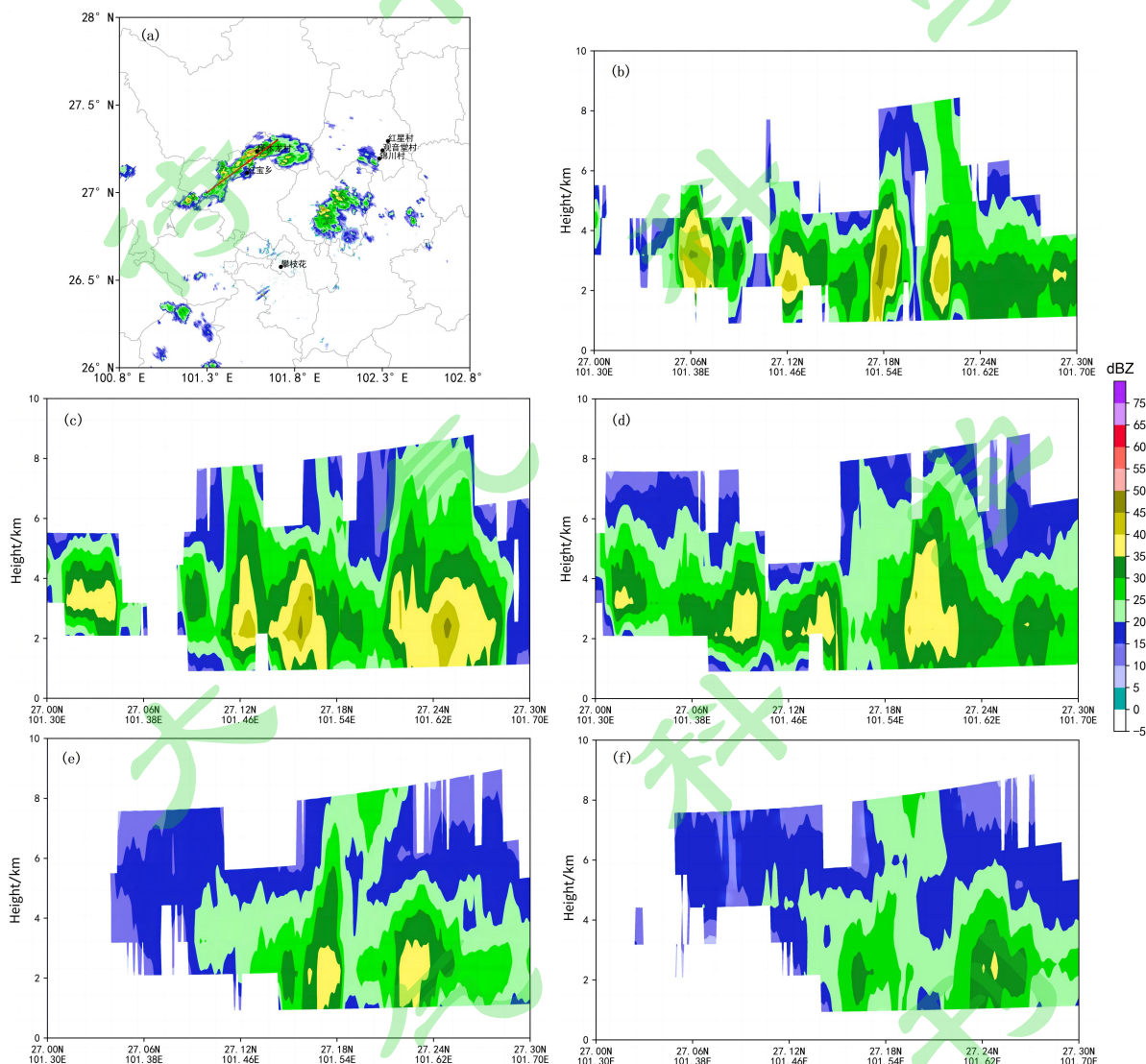


图5 2022年10月5日00时05分攀枝花雷达2.4°仰角雷达回波图(a)和沿(27.0°N,101.3°E)至(27.3°N,101.7°E)垂直剖面图(b:5日00:05,c:5日00:29,d:5日00:58,e:5日01:28,f:5日01:34)

Fig.5 (a) Panzhihua Radar 2.4° Elevation Radar Echo Map at 00:05 on October 5th, 2022 And Vertical Profile Map along (27.0°N,101.3°E) to (27.3°N,101.7°E) at (b) 00:05 on 5th, (c) 00:29 on 5th, (d) 00:58 on 5th, (e) 01:28 on 5th, and (f) 01:34 on 5th

2022年10月5日00时-02时为择木龙村一带的较强降水时段之一。图5(a)为2022年10月5日00时05分攀枝花雷达2.4°仰角雷达回波图,可见择木龙村一带有带状回波,由许多有规则排列的对流单体组成,选取其移动方向(西南向东北,图中红色线条所示,其起始位置为27.0°N,101.3°E,终点位置为27.3°N,101.7°E)作垂直剖面图(图5b、c、d、e、f),可见,00:05回波由多个对流单体组成,垂直最大发展高度达8km左右,但其较强质心多在4.5km以下。由00:05-00:58垂直剖面图可见,对流系统前侧对流单体不断向前移动,其后侧不断有新的对流单体生成,形成“列车效应”,有利于暴雨的产生。由01:28-01:34

垂直剖面图可见，其质心减弱十分迅速，表明其具有较强的降水效率。

4 形成原因分析

4.1 大气层结条件

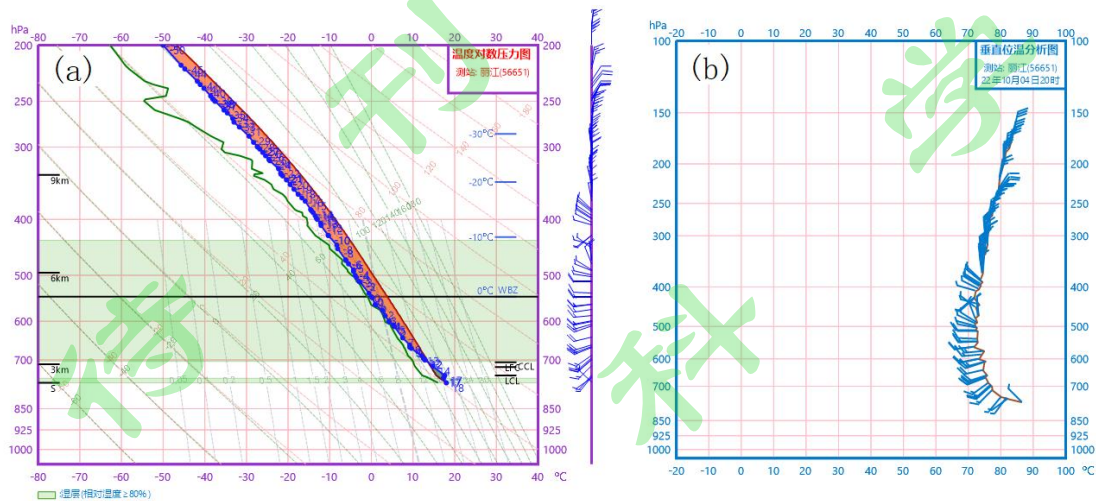


图 6 2022 年 10 月 4 日 20 时丽江站温度对数压力图(a)和假相当位温垂直分布图(b)

Fig.6 (a) Logarithmic Scale Diagram of Temperature Pressure Relationship at Lijiang Station at 20:00 on October 4th, 2022 and (b) Vertical Distribution Diagram of Pseudo-equivalent Temperature

选取离择木龙村和观音堂村一带最近，位于两地西南侧的丽江站探空观测资料(图 6)，分析其温度对数压力图(图 6a)，从大气层结看，约 470hPa-700hPa 为湿层，相对湿度超过 80%，约 470hPa 以上为干层，形成上干下湿的不稳定结构，有利于位势不稳定的发展加强。对流有效位能(CAPE)为 $1547.3\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，对流抑制能量(CIN)较小，为 $21.3\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，表明大气环境层结状态不稳定且对流极易被触发，非常有利于短时强降水和雷暴大风等对流天气的发生(丁一汇, 2005; 雷蕾等, 2011; 孙明生等, 2012; 孙继松等, 2014; 郑永光等, 2017)。对流凝结高度(CCL)为 2901.9m，抬升凝结高度(LCL)为 2620.3m，自由对流高度(LFC)为 3075.2m，丽江站海拔高度为 2394.4m，对流凝结高度、抬升凝结高度和自由对流高度三者都离地面很近，较低的对流凝结高度、抬升凝结高度和自由对流高度使得气块不需要太强的抬升作用就能产生垂直上升运动和水汽凝结，从而使雷暴系统迅速发展(Brooks,2003;陈双等, 2016; 李琴和邓承之, 2021)。分析其假相当位温垂直分布图(图 6b)，地面假相当位温为 79.16°C ，说明近地面有充分的能量积累，之后假相当位温随高度降低，地面至 500hPa 差值接近 8°C ，表明中低层为潜在不稳定热力层结。从垂直风切变看，垂直风切变较弱，从而降低了未饱和干冷空气的卷入，减弱夹卷率，提高了降水效率。

4.2 局地影响天气系统的雷达资料分析

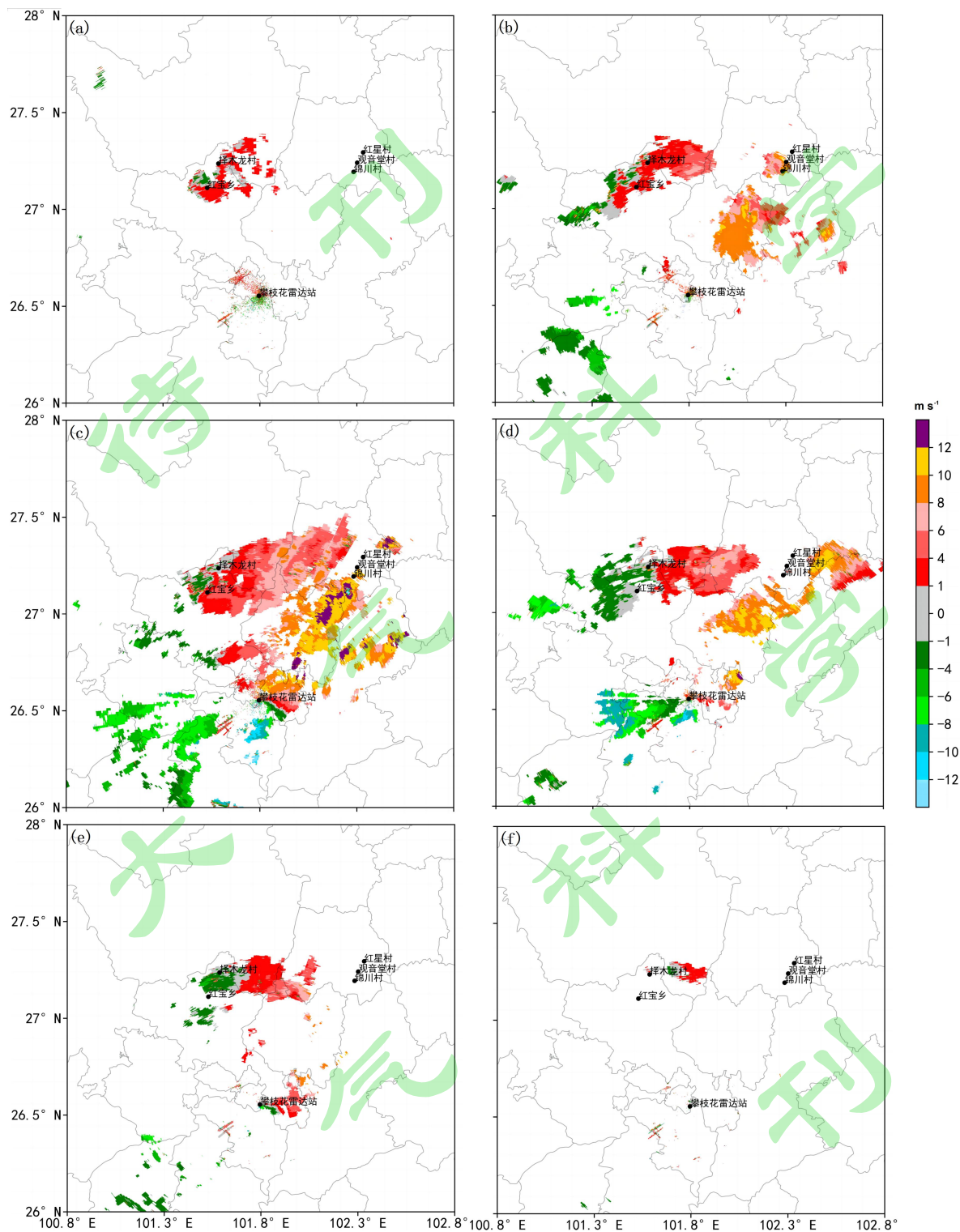


图 7 2022 年 10 月 4-5 日攀枝花雷达 2.4°仰角径向速度图(a:4 日 22:18,b:5 日 00:17,c:5 日 03:03,d:5 日 05:07,e:5 日 07:59,f:5 日 09:04)

Fig.7 Panzhihua Radar 2.4° Elevation Radial Velocity Diagram from October 4th to 5th in 2022 at (a)22:18 on October 4th, (b) 00:17 on October 5th, (c) 03:03 on October 5th, d) 05:07 on October 5th, e) 07:59 on October 5th, and f) 09:04 on October 5th

图 7 为 2022 年 10 月 4-5 日 2.4°仰角径向速度图，由图可见，22:18 在红宝乡一带出现了辐合流场。00:17，在攀枝花西北部有气旋式流场，入流和出流径向速度均达到了 $6-8\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ，而在攀枝花至观音堂村一带有大风速区存在，最大风速达 $10-12\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。03:03 红宝乡、红土龙村一带辐合流场继续维持，而在攀枝花至观音堂村一带有西南低空急流出现，在径向速度

图上还出现了速度模糊,红宝乡、择木龙村一带辐合流场和气旋式流场位于西南低空急流左侧。05:07,红宝乡、择木龙村一带辐合流场和气旋式流场继续维持,攀枝花东北部至观音堂村一带风速略有减弱。07:09,红宝乡、择木龙村一带气旋式流场维持并略向东北移动,而西南低空急流已减弱消失。09:04,择木龙村一带气旋式流场减弱,并将逐渐消失。

综合分析可见,攀枝花西北部气旋式流场和辐合流场的存在,是该地不断有对流生成,形成“列车效应”,造成择木龙村有极端降水产生的原因,该区域位于低空西南气流的左侧,有利于其发展和维持,西南低空急流的正前方也有利于较强降水的出现(孙继松, 2005; 徐珺等, 2018; 雷蕾等, 2020; 罗亚丽等, 2020; 黄小彦等, 2020)。

那么,从上文图 2 分析可知,在 700hPa 和 500hPa,上述地区均无明显斜压性天气系统存在,其辐合流场和气旋式流场是如何发生发展和维持的?主要有以下两个方面原因。

4.2.1 地形作用

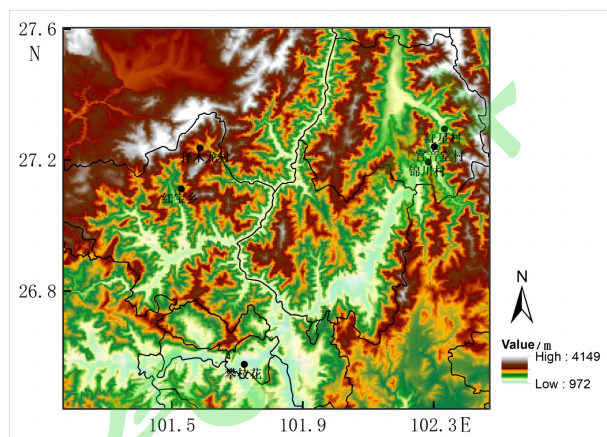


图 8 四川攀西地区南部地形高程图

Fig.8 Topographic elevation map of the southern part of Panxi area in Sichuan

图 8 为四川攀西地区南部地形高程图,可见攀枝花西北部边缘至凉山州盐源县一带有西南向东北走向的山脉存在,特别是择木龙村西北方向是百灵山,其最高点穿洞子海拔达 4196m。地形的强迫抬升和屏障作用对大气运动有显著影响(Chen and Lin, 2005; 李艺苑等, 2009; 金妍和李国平, 2021),可导致暴雨中尺度对流系统的触发、增强和演变(Smith and Barstad, 2004; 赵玉春等, 2012)。由于攀枝花西北部海拔较高,当西南气流北上时,地形阻挡作用致其绕流,形成了图 7 中在雷达径向速度图上观测到的气旋式流场和辐合流场,影响形成了本次暴雨天气过程。在观音堂村一带,其东北部为西北东南走向的螺髻山山脉,最高海拔达 4359m,西南低空急流与之接近正交,地形能强迫气流抬升,在山前的低洼地带形成了较强降水。本次个例,在择木龙村一带和观音堂村一带暴雨的形成中,地形均发挥了重要作用,择木龙村一带暴雨形成中地形发挥的作用主要以地形阻挡作用为主,而在观音堂村一带则以强迫抬升为主。

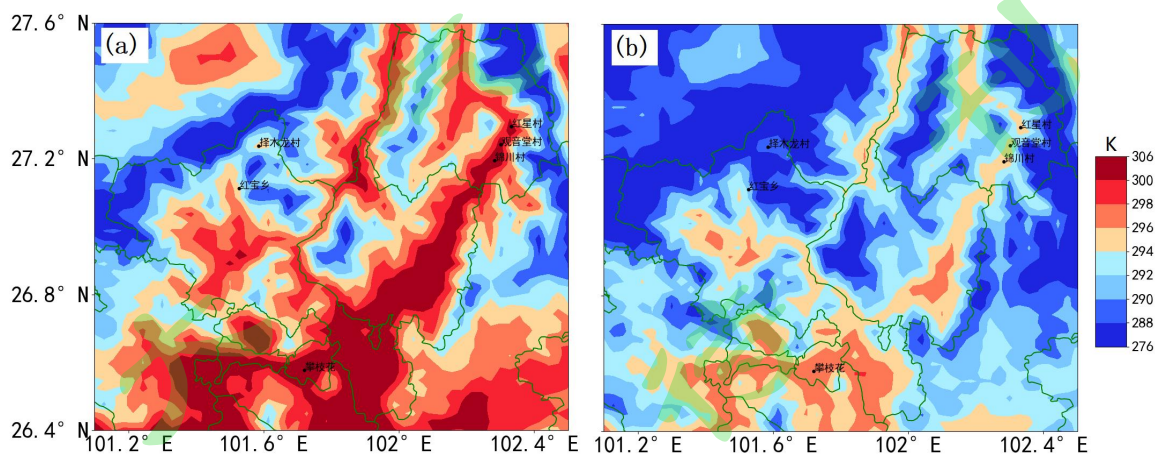


图 9 2022 年 10 月 5 日 0 时(a)和 07 时(b)多源融合气温分布

Fig.9 Multi-source Fused Temperature Distribution at (a) 0:00 and (b) 07:00 on October 5th, 2022

图9为2022年10月5日0时和07时多源融合气温分布图,可见由于地形作用,形成了气温分布的大梯度区,择木龙村和观音堂村一带0时最大气温梯度接近30K,07时最大气温梯度有所减小,但也接近20K,受温度梯度影响,将出现在暖空气一侧上升,冷空气一侧下沉的地形环流,从而加强高气温梯度区的上升运动(Koch,1984;Trapp,2013;徐珺等, 2018)。Zhang等(2011)的数值模拟也表明高气温梯度区存在上升运动,这种上升运动有利于对流触发和加强。

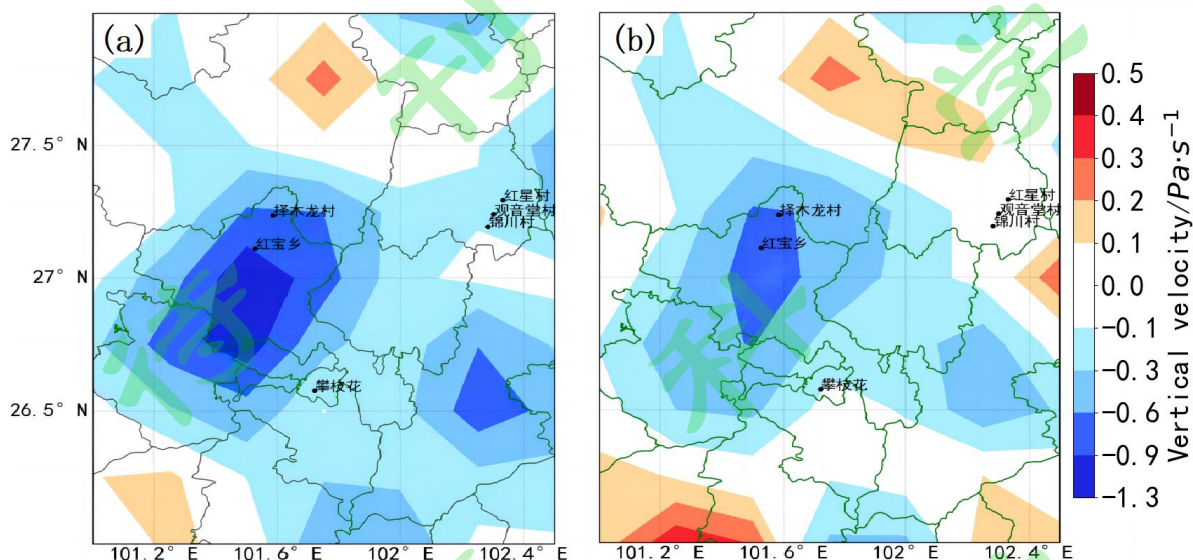


图 10 2022 年 10 月 5 日 0 时(a)和 07 时(b)700hPa 垂直速度的分布

Fig.10: Distribution of Vertical velocity at 700hPa on October 5th,2022 at (a)0:00 and (b)07:00

图10分别为2022年10月5日0时和07时700hPa垂直速度分布图,可见,由于地形阻挡作用形成了气旋式和辐合流场,以及地形导致温度梯度较大形成暖侧上升,冷侧下沉环流及地形抬升作用共同影响,在攀枝花西北部有较强上升运动存在,且较稳定维持,0时最大上升速度达 $-0.9\text{Pa}\cdot\text{s}^{-1}$ 至 $-1.3\text{Pa}\cdot\text{s}^{-1}$,07时最大上升速度达 $-0.6\text{Pa}\cdot\text{s}^{-1}$ 至 $-0.9\text{Pa}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

综合可见,地形阻挡作用形成的气旋式和辐合流场,地形温度梯度造成的地形环流综合作用抬升低层暖湿空气,触发了降水的形成,同时也促进了对流系统的不断维持、发展和加强。

4.2.2 西南低空急流作用

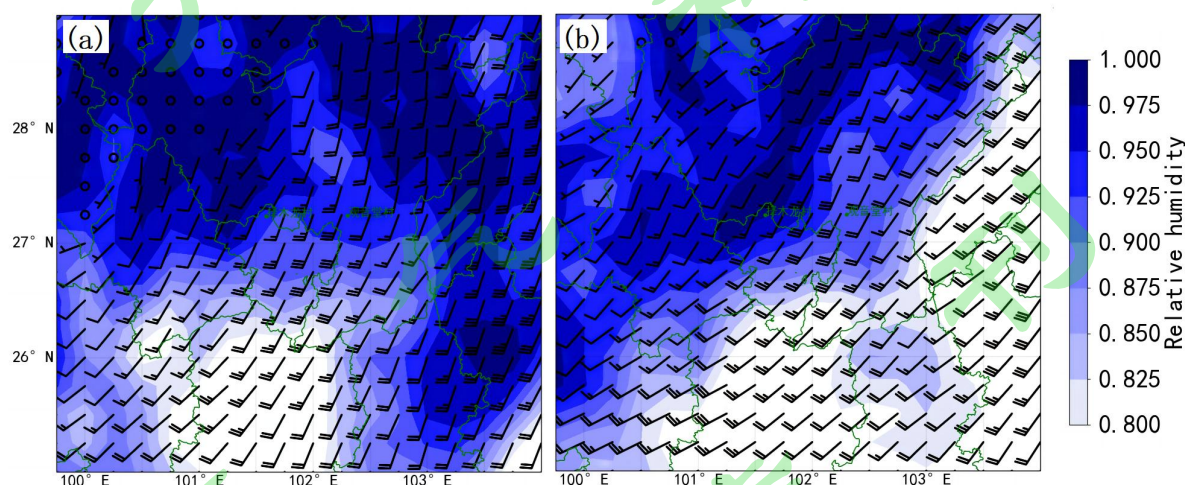


图 11 2022 年 10 月 5 日 01 时(a)和 09 时(b)700hPa 高空图(风向杆为风,单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)

Fig.11 700hPa high-altitude map at (a)01:00 and (b)09:00 on October 5th,2022(wind(vector), unit: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)

研究(Junker,et al.,1999;Moore,et al.,2003)表明,低空急流将低层的暖湿空气向强降水区域输送,能提高湿静力能,并且在急流下方产生辐合,可能导致重力波不稳定(孙淑清和翟国庆, 1980)和湿位涡发展(翟国庆等, 1999),为产生暴雨提供有力的动力热力条件(朱乾根等, 1975; Tao and Chen,1987;Chen,et al.,1998)。而暴雨过程中凝结潜热加热导致地面气压降低和高空辐散增强,垂直次级环流增强,从而加速低空急流,这种正反馈作用对暴雨的发展起重要作用(Chou,et al.,1990;Qian,et

al.,2004;Zhao,2012)。图 11 为 2022 年 10 月 5 日 01 时和 09 时 700hPa 高空图,10 月 4 日 20-23 时,攀枝花至观音堂村一带西南气流逐渐增强,01 时达急流标准,稳定维持至 09 时,观音堂村一带位于西南低空急流的前方,有利于暴雨发生。择木龙村一带位于西南低空急流的左前方,在西南低空急流的左前方一方面引起水汽输送和辐合,另一方面也促进对流不稳定能量再生,有利于对流发生发展(孙继松, 2005; 徐珺等, 2018; 雷蕾等, 2020; 罗亚丽等, 2020; 黄小彦等, 2020)。

5 结论与讨论

本文利用地面自动站逐时降水资料、多源融合逐时气温资料、高空观测资料、FY-4A 气象卫星资料、X 波段双偏振雷达资料和 ERA5 再分析资料,对四川省南部攀西地区 2022 年 10 月 4 日 20 时-5 日 12 时的局地暖区暴雨过程中尺度特征及形成原因进行分析,获得以下主要结论。

(1)本次暴雨天气过程无明显斜压性天气系统影响,为暖区局地暴雨天气过程,降水可分为择木龙村一带和观音堂村一带 2 个片区,降水具有雨强大、雨量相对集中、范围小、突发性强和持续时间较长的特点。

(2)此次暴雨天气过程中尺度对流系统为 β - γ 中尺度,暴雨中尺度对流系统垂直方向存在倾斜,破坏了中尺度对流系统的自毁机制,使得对流系统得以较长时间的维持和发展。在雷达回波上,择木龙村一带回波呈带状分布,表现出明显的后向传播特征,“列车效应”显著,较强回波质心较低,多在 4.5km 以下,其单体质心减弱十分迅速,表明其有较强的降水效率。

(3)此次暴雨天气过程大气层结具有上干下湿、对流有效位能大、对流抑制能量小,近地面假相当位温高且随高度快速降低的位势不稳定层结条件。对流凝结高度、抬升凝结高度和自由对流高度较低,使雷暴系统迅速发展。垂直风切变较弱,降低了未饱和干冷空气的卷入,减弱夹卷率,提高了降水效率。

(4)在择木龙村一带和观音堂村一带暴雨的形成中,地形和西南低空急流均发挥了重要作用。攀枝花西北部边缘地形的阻挡作用形成的辐合流场和气旋式流场使得择木龙村一带不断有对流生成,形成“列车效应”,而观音堂村一带,西南低空急流与其东北部山脉接近正交,地形强迫气流抬升,在山前的低洼地带形成了较强降水。由于地形作用形成的风速辐合,地形温度梯度造成的地形环流也对暴雨的形成起到促进作用。择木龙村一带位于西南低空急流左前方,观音堂村一带位于西南低空急流的正前方,均有利于对流发生发展。

与以往研究相比,由于受大气环流变化影响,本个例中尺度对流系统垂直方向存在明显的倾斜,这种倾斜作用在垂直风切变较弱的环境中,可以使降水导致的下沉气流和上升气流相互错开,减弱风暴自毁机制,使得对流系统可以较长时间的维持和发展,而同时,较弱的垂直风切变降低了未饱和干冷空气的卷入,减弱夹卷率,提高了降水效率。同时我们通过对雷达观测资料的分析,得出地形阻挡作用形成的气旋性环流系统是造成本暖区暴雨两个例的主要影响系统,并且对流回波具有明显的后向传播特征,“列车效应”显著,导致了极端降水的出现。然而这种倾斜风暴的精细化结构是怎么样的?其内部上升气流、下沉气流如何发展演变?地形阻挡形成气旋式和辐合流场的具体机制是什么?西南低空急流、地形环流在何种条件下可以触发和形成强对流天气?这些问题还需要我们今后进行进一步的研究分析。

参考文献(References)

- Bluestein H B, Marx G T, Jain M H.1987. Formation of Mesoscale Lines of Precipitation, Nonsevere Squall Lines in Oklahoma during the Spring[J]. Monthly Weather Review, 115(11): 2719-2727.
- Brooks H E, Lee J W, Craven J P.2003. The spatial distribution of severe thunderstorm and tornado environments from global reanalysis data[J]. Atmos Res,67-68:73-94.
- 陈静,薛纪善,颜宏.2003.物理过程参数化方案对中尺度暴雨数值模拟影响的研究[J].气象学报,61(2):203-218.Chen Jing, Xue Jishan, Yan Hong.2003. The impact of physics parameterization schemes on mesoscale heavy rainfall simulation[J]. Acta Meteor Sinica,61(2):203-218(in Chinese).
- Chen J H, Wu X Q, Yin Y, et al.2015.Characteristics of Heat Sources and Clouds over Eastern China and the Tibetan Plateau in Boreal Summer[J].Journal of Climate, 28(18):7279-7296.doi:10.1175/jcli-d-14-00859.1.
- Chou L C, Chang C P, Williams R T.1990. A numerical simulation of the Mei-Yu front and the associated low level jet[J]. Mon Wea Rev,118(7):1408-1428.doi:10.1175/1520-0493(1990)118<1408:ANSOTM>2.0.CO;2
- 陈明轩,王迎春,肖现,等.2013.北京“7.21”暴雨雨团的发生和传播机理[J].气象学报,71(4):569-592.Chen Mingxuan, Wang Yingchun, Xiao Xian, et al.2013. Initiation and propagation mechanism for the Beijing extreme heavy rainstorm clusters on 21 July 2012[J]. Acta Meteor Sinica,71(4):569-592(in Chinese).doi:10.11676/qxxb2013.053

- 陈双,王迎春,张文龙.2016.北京香山“7.29” γ 中尺度短时局地大暴雨过程综合分析[J].暴雨灾害,35(2):148-157.Chen Shuang, Wang Yingchun, Zhang Wenlong.2016. A comprehensive analysis of the meso- γ scale local heavy rain event around Xiangshan in Beijing on 29 July 2009[J]. Torrential Rain and Disasters,35(2):148-157.doi:10.3969/j.issn.1004-9045.2016.02.007
- Chen S H, Lin Y L.2005. Orographic effects on a conditionally unstable flow over an idealized three-dimensional mesoscale mountain[J]. Meteorology and Atmospheric Physics,88(1/2):1-21.doi:10.1007/s00703-003-0047-6.
- Chen S J, Kuo Y H, Wang W, et al.1998. A modeling case study of heavy rainstorms along the Mei-Yu front[J]. Mon Wea .Rev,126(9):2330-2351.doi:10.1175/1520-0493(1998)126<2330:AMCSOH>2.0.CO;2
- 湛芸,孙军,徐珺,等.2012.北京 721 特大暴雨极端性分析及思考(一)观测分析及思考[J].气象,38(10):1255-1266.Chen Yun, Sun Jun, Xu Jun,et al.2012. Analysis and thinking on the extremes of the 21 July 2012 torrential rain in Beijing part I:observation and thinking[J]. Meteor Mon,38(10):1255-1266(in Chinese).
- 湛芸,吕伟琦,于超,等.2018.北方一次暖区大暴雨降水预报失败案例剖析[J].气象,44(1):15-25.Chen Yun, Lv Weiqi, Yu Chao,et al.2018. Analysis of a forecast failure case of warm area torrential rainfall in North China[J]. Meteor Mon,44(1):15-25(in Chinese).
- 陈云辉,金米娜,许爱华.2015.江西省一次短历时暖区暴雨中尺度结构及发生维持机制分析[J].气象与减灾研究,38(3):26-34.Chen Yunhui,Jin Mina,Xu Aihua.2015 .Analysis of mesoscale structure and maintenance mechanism of a short duration warm rainstorm in Jiangxi[J].Meteor Disaster Reduct Res,38(3) :26-34(in Chinese).
- 程正欣,包澄澜.1990.暖湿气流中大暴雨成因的中尺度数值试验[J].气象学报,48(4):480-485.Cheng Zhengxin, Bao Chenglan.1990. Numerical simulation of heavy rain in a moist atmosphere[J]. Acta Meteor Sinica,48(4):480-485(in Chinese).
- 段伯隆,张文龙,刘海文,等.2017.北京“7.21”特大暴雨过程暖区降水和锋面降水的时空分布特征[J].暴雨灾害,36(2):108-117.Duan Bolong, Zhang Wenlong, Liu Haiwen,et al.2017. The spatial and temporal distributions of warm area rainfall and frontal rainfall for the torrential rain event in Beijing on 21 July 2012[J]. Torr Rain Dis,36(2):108-117(in Chinese).doi:10.3969/j.issn.1004-9045.2017.02.002
- Doswell III C A, Brooks H E, Maddox R A. 1996. Flash flood forecasting,An ingredients based methodology [J]. Wea Forecasting, 11(4): 560-581.
- Du Y, Chen G X. 2018. Heavy rainfall associated with double low-level jets over Southern China. Part I: Ensemble-based analysis[J]. Mon.Wea. Rev., 146(11): 3827-3844. doi:10.1175/mwr-d-18-0101.1
- Du Y, Chen G X. 2019. Heavy rainfall associated with double low-level jets over Southern China. Part II: Convection initiation [J]. Mon.Wea. Rev., 147(2): 543-565. doi:10.1175/mwr-d-18-0102.1
- 丁一汇.2005.高等天气学:第2版[M].北京:气象出版社:318-320.Ding Yihui.2005. Advanced Synoptic Meteorology[M].2nd ed.Beijing:China Meteorological Press:318-320(in Chinese).
- 方翀,毛冬艳,张小雯,等.2012.2012年7月21日北京地区特大暴雨中尺度对流条件和特征初步分析[J].气象,38(10):1278-1287.Fang Chong, Mao Dongyan, Zhang Xiaowen,et al.2012. Analysis on the mesoscale convective conditions and characteristics of an extreme torrential rain in Beijing on 21 July 2012[J]. Meteor Mon,38(10):1278-1287(in Chinese).
- 付智龙,李国平,姜凤友,等.2022.四川盆地西部一次暖区山地暴雨事件的动力过程分析与局地环流数值模拟[J].大气科学,46(6):1366-1380. Fu Zhilong, Li Guoping, Jiang Fengyou, et al. 2022. Dynamic Analysis and Local Circulation Numerical Simulation of a Warm-sector Mountain Rainstorm Event in the Western Sichuan Basin [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 46(6): 1366-1380 (in Chinese). doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2110.21054
- 高洁,王明田,郭善云,等.2022.四川省降雨灾情时空分布及其与雨量相关特征分析[J].气象科技,50(2):224-233.Gao Jie, Wang Mingtian, Guo Shanyun,et al.2022. Spatial and Temporal Distribution of Rainfall Disasters and Analysis of Its Rainfall-Related Characteristics in Sichuan Province[J]. Meteor Sci Technol,50(2):224-233.
- 何立富,陈涛,孔期.2016.华南暖区暴雨研究进展[J].应用气象学报,27(5):559-569.He Lifu, Chen Tao, Kong Qi.2016. A review of studies on prefrontal torrential rain in South China[J]. J Appl Meteor Sci,27(5):559-569(in Chinese).doi:10.11898/1001-7313.20160505
- Huang L,Luo Y L.2017. Evaluation of quantitative precipitation forecasts by TIGGE ensembles for South China during the presummer

- rainy season[J].Geophys Res,122(16):8494-8516.
- 黄士松.1986.华南前汛期暴雨[M].广州:广东科技出版社:212-244.Huang Shisong.1986. Heavy Rainfall in South China during the Pre-Rainy Season[M].Guangzhou:Guangdong Science Press:212-244(in Chinese).
- 黄小彦,孙继松,刘文婷.2020.地形作用下低空急流的演变与强降水对流风暴系统的相互作用[J].气象学报,78(4):551-567.Huang Xiaoyan, Sun Jisong, Liu Wenting.2020. The interaction between low-level jet evolution and severe convective rainstorms under topographic effect[J]. Acta Meteorologica Sinica,78(4):551-567.doi:10.11676/qxxb2020.034
- Junker N W,Schneider R S,Fauver S L.1999. A study of heavy rainfall events during the Great Midwest Flood of 1993[J].Wea Forecasting,14(5):701-712.doi:10.1175/1520-0434(1999)014<0701:ASOHRE>2.0.CO;2
- 金妍,李国平.2021.爬流和绕流对山地突发性暴雨的影响[J].高原气象.40(2):314-323.Jin Yan, Li Guoping.2021. Impact of Flow around and Flow over in Sudden Rainstorm on Mountains[J]. Plateau Meteorology.40(2):314-323.
- 孔凡超,赵庆海,李江波.2016.2013 年 7 月冀中特大暴雨的中尺度系统特征和环境条件分析[J].气象,42(5):578-588.Kong Fanchao, Zhao Qinghai, Li Jiangbo.2016. Diagnostic analysis of mesoscale system and environmental conditions during Hebei severe rainstorm[J].Meteor Mon,42(5):578-588(in Chinese).
- Koch S E.1984. The role of an apparent mesoscale frontogenetic circulation in squall line initiation[J]. Mon Wea Rev, 112(10):2090-2111.doi:10.1175/1520-0493(1984)112<2090:TROAAM>2.0.CO;2
- 雷蕾,孙继松,魏东.2011.利用探空资料判别北京地区夏季强对流的天气类别[J].气象,37(2):136-141.Lei Lei, Sun Jisong, Wei Dong.2011. Distinguishing the category of the summer convective weather by sounding data in Beijing[J]. Meteor Mon,37(2):136-141(in Chinese).
- 雷蕾,邢楠,周璇,等.2020.2018 年北京“7.16”暖区特大暴雨特征及形成机制研究[J].气象学报,78(1):1-17.Lei Lei, Xing Nan, Zhou Xuan,et al.2020. A study on the warm-area torrential rainfall during 15-16 July 2018 in Beijing area[J]. Acta Meteorologica Sinica,78(1):1-17.doi:10.11676/qxxb2020.001
- 林良勋.2006.广东省天气预报技术手册[M].北京:气象出版社:119-150.Lin Liangxun.2006. Technical Guidance on Weather Forecasting in Guangdong Province[M]. Beijing:China Meteorological Press:119-150(in Chinese).
- 李琴,邓承之.2021.重庆一次弱天气系统强迫下的极端短时强降水事件分析[J].气象,47(9):1073-1085.Li Qin, Deng Chengzhi.2021. Analysis of a Short-Time Extreme Precipitation Event in Chongqing Under Weak Synoptic Forcing[J].Meteor Mon,47(9):1073-1085.
- 刘瑞鑫,孙建华,陈鲍发.2019.华南暖区暴雨事件的筛选与分类研究[J].大气科学,43(1):119-130.doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1803.17245.Liu Ruixin, Sun Jianhua, Chen Baofa. 2019.Selection and Classification of Warm-Sector Heavy Rainfall Events over South China[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences,43(1):119-130.
- 刘瑞鑫,孙建华,傅慎明.2021.不同类型华南暖区暴雨过程的环流特征[J].气候与环境研究,26(4):359-373. Liu Ruixin, Sun Jianhua, Fu Shenming. 2021. Comparison of Synoptic Circulation Characteristics in Different Types of Warm-Sector Heavy Rainfall Events over South China[J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese),26(4):359-373.doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2021.20105
- 廖晓农,俞小鼎,王迎春. 2008.北京地区一次罕见的雷暴大风过程特征分析[J]. 高原气象.27(6): 1350-1362.Liao Xiaonong; Yu Xiaoding; Wang Yingchun.2008. Analysis on an Exceptionally Strong Wind Gust Event in Beijing[J]. Plateau Meteorology. 27(6): 1350-1362.
- 李永军,余谔迪,肖昀何,等.2021.影响攀西地区南部的 MCC 活动特征及发生环境条件[J].高原山地气象研究,41(2):32-41. Li Yongjun, Yu Andi, Xiao Yunhe,,et al.2021. Activity Characteristics and Environmental Conditions of MCC Affecting the Southern Part of Panxi Region[J]. Plateau and Mountain Meteorology Research, 41(2): 32-41(in Chinese). doi: 10.3969/j.issn.1674-2184.2021.02.004
- 罗亚丽,孙继松,李英,等.2020.中国暴雨的科学和预报:改革开放 40 年研究成果[J].气象学报,78(3):419-450.Luo Yali, Sun Jisong, Li Ying,et al.2020. Science and prediction of heavy rainfall over China: Research progress since the reform and opening-up of the People's Republic of China[J]. Acta Meteorologica Sinica,78(3):419-450.doi:10.11676/qxxb2020.057

- Luo Y L, Wu M W, Ren F M, et al. 2016. Synoptic situations of extreme hourly precipitation over China [J]. *J. Climate*, 29(24):8703–8719.doi:10.1175/jcli-d-16-0057.1
- 李艺苑,王东海,王斌.2009.中小尺度过山气流的动力问题研究[J].*自然科学进展*,19(3):310-324.Li Yiyuan, Wang Donghai, Wang Bin.2009. Research on the dynamic problems of small-scale mountain passes[J]. *Progress in Natural Science*,19(3):310-324.
- 吕艺影,银燕,陈景华,等.2018.雨季青藏高原东部 MCC 移动特征及其热动力原因分析[J].*高原气象*. 2018, 37(6): 1511-1527.Lv Y Y,Yin Y,Chen J H,et al.2018. Analysis on Moving Characteristics and Thermodynamic Causes of MCC over Eastern Qinghai-Tibetan Plateau in Rainy Season[J]. *Plateau Meteorology*. 2018, 37(6): 1511-1527.doi:10.7522/j.issn.1000-0534.2018.00056
- Moore J T, Glass F H, Graves C E,et al.2003. The environment of warm-season elevated thunderstorms associated with heavy rainfall over the central United States[J].*Wea Forecasting*,18(5):861-878.doi:10.1175/1520-0434(2003)018<0861:TEOWET>2.0.CO;2
- Parker M D, Johnson R H. 2000. Organizational Modes of Midlatitude Meso scale Convective Systems [J]. *Monthly Weather Review*, 128(10): 3413.
- 齐铎,崔晓鹏,邹强利.2023.2020 年“6·26”冕宁致灾暴雨成因观测分析[J].*大气科学*,47(2):585–598.Qi Duo, Cui Xiaopeng, Zou Qiangli.2023. Observational Analysis of the Causes for the Heavy Rainfall Case in Mianning on 26 June 2020[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*,47(2):585–598(in Chinese).doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2206.21149
- Qian J H,Tao W K,Lau K M. 2004. Mechanisms for torrential rain associated with the Mei-yu development during SCSMEX 1998[J]. *Mon Wea Rev*,132(1):3-27.
- 覃武,刘国忠,赖珍权,等.2020.华南暖区暴雨预报失误及可预报性探讨[J].*气象*,46(8):1039-1052.Qin Wu, Liu Guozhong, Lai Zhenquan.et al.2020. Study on forecast errors and predictability of a warm-area rainstorm in South China[J]. *Meteor Mon*,46(8):1039-1052(in Chinese).
- 孙军,谌芸,杨舒楠,等.2012.北京 721 特大暴雨极端性分析及思考(二)极端性降水成因初探及思考[J].*气象*,38(10):1267-1277.Sun Jun, Chen Yun, Yang Shunan,et al.2012. Analysis and thinking on the extremes of the 21 July 2012 torrential rain in Beijing part II:preliminary causation analysis and thinking[J]. *Meteor Mon*,38(10):1267-1277(in Chinese).
- 孙建华,赵思雄,傅慎明,等.2013.2012 年 7 月 21 日北京特大暴雨的多尺度特征[J].*大气科学*,37(3):705-718.Sun Jianhua, Zhao Sixiong, Fu Shenming, et al. 2013. Multi-Scale Characteristics of Record Heavy Rainfall over Beijing Area on July 21, 2012[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 37(3): 705-718. doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.12202
- 孙继松.2005.气流的垂直分布对地形雨落区的影响[J].*高原气象*,24(1):62-69.Sun Jisong.2005. The effects of vertical distribution of the lower level flow on precipitation location[J].*Plateau Meteor*,24(1):62-69(in Chinese).
- 孙继松,陶祖钰.2012.强对流天气分析与预报中的若干基本问题[J].*气象*,38(2):164-173.Sun Jisong, Tao Zuyu.2012. Some Essential Issues Connected with Severe Convective Weather Analysis and Forecast[J]. *Meteor Mon*,38(2):164-173.
- 孙继松,何娜,王国荣,等.2012.“7.21”北京大暴雨系统的结构演变特征及成因初探[J].*暴雨灾害*,31(3):218-225.Sun Jisong, He Na, Wang Guorong,et al.2012. Preliminary analysis on synoptic configuration evolvement and mechanism of a torrential rain occurring in Beijing on 21 July 2012[J]. *Torr Rain Dis*,31(3):218-225(in Chinese).
- 孙继松,戴建华,何立富,等.2014.强对流天气预报的基本原理与技术方法[M].北京:气象出版社:51,74.Sun Jisong, Dai Jianhua, He Lifu,et al.2014. Fundamental Theory and Technical Methods for Severe Convective Weather Forecasting[M]. Beijing:China Meteorological Press:51,74(in Chinese).
- 孙明生,高守亭,孙继松,等.2012.北京地区暴雨、强对流天气分析与预报技术[M].北京:气象出版社:32-54.Sun Mingsheng, Gao Shouting, Sun Jisong,et al.2012. Analysis and Forecast Technology of Rainstorm and Strong Convective Weather in Beijing[M]. Beijing:China Meteorological Press:32-54(in Chinese).
- 苏鹏程,刘希林,郭洁.2006.四川泥石流灾害与降雨关系的初步探讨[J].*自然灾害学报*,15(4):19-24.Su Pengcheng, Liu Xilin, Guo Jie.2006. Primary analysis of relationship between debris flows and rainfalls in Sichuan Province[J]. *Journal of Natural Disasters*,15(04):19-23.
- Smith R B,Barstad I.2004.A linear theory of orographic precipitation[J].*Journal of the Atmospheric Sciences*,61(12):1377-1391.
- Schumacher R S, Johnson R H. 2005. Organization and Environmental Properties of Extreme-Rain-Producing Mesoscale Convective

- Systems [J].Monthly Weather Review, 133(4): 961-976.
- 孙淑清,翟国庆.1980.低空急流的不稳定性及其对暴雨的触发作用[J].大气科学,4(4):327-337.Sun Shuqing, Zhai Guoqing.1980. On the instability of the low level jet and its trigger function for the occurrence of heavy rain-storms[J]. Sci Atmos Sinica,4(4):327-337(in Chinese).
- Trapp R J.2013. Mesoscale-Convective Processes in the Atmosphere[J]. Cambridge,USA:Cambridge University Press,140-141.
- Tao S Y, Chen L X.1987. A review of recent research on the East Asian summer monsoon in China[M], London:Oxford University,60-92.
- 谭万沛,韩庆玉.1992.四川省泥石流预报的区域临界雨量指标研究[J].灾害学,7(2):37-42.Tan Wanpei, Han Qingyu.1992. Study on Regional Critical Rainfall Indices of Debris Flow in Sichuan Province[J]. Disaster Science,7(02):37-42.
- Wang H, Luo Y, B Jou. 2014. Initiation, maintenance, and properties of convection in an extreme rainfall event during SCMREX [J]. Geophys Res,119(13):13206-13232.
- 王淑莉,康红文,谷湘潜,等.2015.北京“7.21”暴雨暖区中尺度对流系统的数值模拟[J].气象,41(5):544-553.Wang Shuli, Kang Hongwen, Gu Xiangqian,et al.2015. Numerical simulation of mesoscale convective system in the warm area of Beijing “7.21” severe rainstorm[J]. Meteor Mon,41(5):544-553(in Chinese).
- 肖递祥,毛家勋,李庆.2010.“09.7”四川攀西暴雨的 MCS 特征及其成因分析[J].暴雨灾害,29(1):56-60.Xiao Dianxiang, Mao Jiaxun, Li Qing,et al.2010. Analysis on MCS Characteristics and Its Causes of Rainstorm in the Panxi Region of Sichuan Province in July 2009[J]. Torrential Rain and Disasters,29(1):56-60.
- 肖红茹,王佳津,肖递祥,等.2021.四川盆地暖区暴雨特征分析[J].气象,47(3):303-316.Xiao Hongru, Wang Jiajin, Xiao Dianxiang,et al.2021. Analysis of Warm-area Rainstorm Characteristics over Sichuan Basin[J]. Meteor Mon,47(3):303-316.
- 徐珺,毕宝贵,谌芸,等.2018.“5.7”广州局地突发特大暴雨中尺度特征及成因分析[J].气象学报,76(4):511-524.Xu Jun, Bi Guigui, Chen Yun,et al.2018. Mesoscale characteristics and mechanism analysis of the unexpected local torrential rain in Guangzhou on 7 May 2017[J]. Acta Meteorologica Sinica,76(4):511-524.doi:10.11676/qxxb2018.016
- 徐珺,杨舒楠,孙军,等.2014.北方一次暖区大暴雨强降水成因探讨[J].气象,40(12):1455-1463.Xu Jun, Yang Shunan, Sun Jun,et al.2014. Discussion on the Formation of a Warm area Torrential Rain Case in North China[J]. Meteor Mon,40(12):1455-1463.
- 夏茹娣,赵思雄,孙建华.2006.一类华南锋前暖区暴雨 β 中尺度系统环境特征的分析研究[J].大气科学,30(5):988-1008.Xia Rudi, Zhao Sixiong, Sun Jianhua.2006. A study of circumstances of meso- β -scale systems of strong heavy rainfall in warm area ahead of fronts in South China[J]. Chinese J Atmos Sci,30(5):988-1008(in Chinese).doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2006.05.26
- 杨康权,卢萍,张琳.2017.高原低涡影响下的一次暖区强降水特征分析[J].热带气象学报,33(3):415-425.Yang Kangquan, Lu Ping, Zhang Lin.2017. Analyses of heavy rainstorm in warm area under the influence of the low-pressure system of Qinghai-Xizang Plateau[J]. J Trop Meteor,33(3):415-425(in Chinese).
- 杨康权,肖递祥,罗辉,等.2019.四川盆地西部两次暖区暴雨过程分析[J].气象科技,47(5):795-808.Yang Kangquan, Xiao Dianxiang, Luo Hui,et al.2019. Analysis of two warm-area heavy rain process in Western Sichuan Basin[J]. Meteor Sci Technol,47(5):795-808(in Chinese).
- 周长春,吴蓬萍,周秋雪.2015.一次复杂地形暖区强降水的特征及触发机制分析[J].暴雨灾害, 34(1): 27-33.Zhou Changchun, Wu Pengping, Zhou Qiuxue. 2015. Analysis of the characteristics and trigger mechanism of the warm-sector heavy precipitation over complex terrain[J]. Torrential Rain and Disasters, 34(1): 27-33(in Chinese).
- Zhang D L,Shou Y X,Dickerson R R,et al.2011. Impact of upstream urbanization on the urban heat island effects along the Washington-Baltimore Corridor[J]. J Appl Meteor Climatol,50(10):2012-2029.doi:10.1175/JAMC-D-10-05008.1
- 翟国庆,丁华君,孙淑清,等.1999.与低空急流相伴的暴雨天气诊断研究[J].大气科学,23(1):113-119.Zhai Guoqing, Ding Huajun, Sun Shuqing,et al.1999. Physical characteristics of heavy rainfall associated with strong low level jet[J]. Chinese J Atmos Sci,23(1):113-119(in Chinese).
- 张家国,周金莲,谌伟,等.2015.大别山西侧极端降水中尺度对流系统结构与传播特征[J].气象学报,73(2):291-304.Zhangjiaguao, Zhou Jinlian, Chen Wei,et al.2015. The structure and propagation characteristics of the extreme-rain-producing MCS on the west side of Dabie Mountain[J]. Acta Meteorologica Sinica,73(2):291-304.doi:10.11676/qxxb2015.019

- Zhong L Z, Mu R, Zhang D L, et al. 2015. An observational analysis of warm sector rainfall characteristics associated with the 21 July 2012 Beijing extreme rainfall event[J]. *Geophys Res Atmos*, 120(8):3274-3291.
- 周明飞, 杜小玲, 熊伟. 2014. 贵州初夏两次暖区暴雨的对比分析[J]. *气象*, 40(2):186-195. Zhou Mingfei, Du Xiaoling, Xiong Wei. 2014. Comparison analysis of two warm area torrential rain systems in early summer in Guizhou[J]. *Meteor Mon*, 40(2):186-195(in Chinese).
- 朱乾根. 1975. 低空急流与暴雨[J]. *气象科技资料*, 1975(8):12-18. Zhu Qiangen. 1975. The low-level jet and heavy rainfall[J]. *Meteor Sci Technol*, 1975(8):12-18(in Chinese).
- 赵玉春, 许小峰, 崔春光. 2012. 川西高原东坡地形对流暴雨的研究[J]. *气候与环境研究*, 17(5):95-104. Zhao Yuchun, Xu Xiaofeng, Cui Chunguang. 2012. A Study of Convective Rainstorms along the East Slope of Western Sichuan Plateau[J]. *Climatic and Environmental Research*, 17(5):607-616(in Chinese).
- Zhao Y C. 2012. Numerical investigation of a localized extremely heavy rainfall event in complex topographic area during midsummer[J]. *Atmos Res*, 113(5):22-39. doi:10.1016/j.atmosres.2012.04.018
- 郑永光, 陶祖钰, 俞小鼎. 2017. 强对流天气预报的一些基本问题[J]. *气象*, 43(6):641-652. Zheng Yongguang, Tao Zuyu, Yu Xiaoding. 2017. Some essential issues of severe convective weather forecasting[J]. *Meteor Mon*, 43(6):641-652(in Chinese).
- 宗志平, 陈涛, 徐珺, 等. 2013. 2012 年初秋四川盆地两次西南涡暴雨过程的对比分析与预报检验[J]. *气象*, 39(5):567-576. Zong Zhiping, Chen Tao, Xu Jun, et al. 2013. Analysis and forecast verification of two southwest vortex torrential rain events in Sichuan Basin in early autumn of 2012[J]. *Meteor Mon*, 39(5):567-576(in Chinese).