

周文,王晓芳,杨浩,等,2021.造成贵州水城“7·23”山体滑坡的大暴雨成因分析[J].气象,47(8):982-994. Zhou W, Wang X F, Yang H, et al, 2021. Causes analysis of severe torrential rain inducing the landslide in Shuicheng of Guizhou Province on 23 July 2019[J]. Meteor Mon, 47(8):982-994(in Chinese).

造成贵州水城“7·23”山体滑坡的大暴雨成因分析^{*}

周 文 王晓芳 杨 浩 王婧羽 李山山

中国气象局武汉暴雨研究所暴雨监测预警湖北省重点实验室,武汉 430205

提 要: 利用中国气象局地面站降水资料、欧洲中心 ERA5 再分析资料、FY-4A 相当黑体亮温资料,分析了造成贵州水城 2019 年 7 月 23 日山体滑坡的大暴雨成因。结果表明,最强降水是由 TBB 低于 -82°C 的对流云带造成的,影响本次强降水的天气系统主要为贵州西部 750~700 hPa 低槽及四川盆地北部冷锋。暴雨发生之前,四川盆地北部冷锋迫使盆地内高能气团向贵州西北部移动。随着水城县鸡场镇南侧偏南气流发展,为强降水发生提供充足的水汽条件,同时因暖湿气流的增强使得鸡场镇低层对流不稳定性增强。降水初期(22 日 20 时)上升运动主要位于 700 hPa 以下,这与鸡场镇地面偏东气流遇到地形阻挡、沿地形爬坡产生的上升运动影响有关。随天气尺度气旋性环流扩展到贵州境内,降水只发生在气旋性环流内较狭窄的带中。通过 Barnes 带通滤波分析,天气尺度的气旋性流场内存在一些小尺度的气旋、反气旋系统,鸡场镇西侧有两个小气旋环流,它们北侧的强气流汇合带正好是降水发生区,鸡场镇此时还位于一个小尺度鞍形场区域中,明显有利于中低层气流汇合,叠加地形性上升运动,导致突发性暴雨发生,造成了山体滑坡的形成。

关键词: 暴雨,山体滑坡,FY-4A

中图分类号: P458

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2021.08.006

Causes Analysis of Severe Torrential Rain Inducing the Landslide in Shuicheng of Guizhou Province on 23 July 2019

ZHOU Wen WANG Xiaofang YANG Hao WANG Jingyu LI Shanshan

Hubei Key Laboratory for Heavy Rain Monitoring and Warning Research, Institute of Heavy Rain, CMA, Wuhan 430205

Abstract: Based on the precipitation data from China Meteorological Administration, ERA5 (the fifth generation of European Centre for Medium-Range Weather Forecasts Reanalysis) reanalysis data and the TBB (black-body temperature) data from FY-4A, the factors for the severe torrential rain causing landslide on 23 July 2019 were investigated. The results are as follows. The heaviest precipitation at 22:00 BT was caused by the convective cloud belt with TBB below -82°C . The synoptic systems were 750—700 hPa low trough and the cold front in the north of Sichuan Basin. Before the torrential rain, the cold front in the north of Sichuan Basin drove the air with large energy to flow from the basin to northwestern Guizhou. With the development of southern airflow in the south of Jichang Town, Shuicheng County of Guizhou Province, sufficient water vapor conditions were provided for the occurrence of the severe rainstorm. Meanwhile, the enhancement of warm and humid airflow made the convective instability in the lower layer of Jichang Town increase. At the beginning of the precipitation period (20:00 BT 22 July), the upward

^{*} 国家重点研发计划(2018YFC1507202)、国家自然科学基金项目(41975058、41620104009、91637211)、湖北省气象局科技发展基金项目(2018Y03)和湖北省气象局发展基金青年项目(2020Q02)共同资助

2020 年 8 月 3 日收稿; 2021 年 4 月 6 日收修定稿

第一作者:周文,主要从事暴雨机理研究. E-mail:zhouwen_zhouw@163.com

通讯作者:王晓芳,主要从事暴雨机理研究. E-mail:Tiaotiao98@163.com

movement was mainly below 700 hPa, which was related to the influence of the easterly airflow that encountered the topographic obstruction and climbed along the slope of the terrain at Jichang Town. As the synoptic-scale cyclonic circulation extended into Guizhou Province, widespread precipitation occurred only in the narrow zones of the cyclonic circulation. After Barnes band-pass filter analysis, it is found that there were a number of small-scale cyclones and anticyclones in the synoptic-scale cyclonic flow field, and two small cyclone circulation on the west side of Jichang Town. The strong convergence zone on the north side of them was just the severe precipitation zone. At the same time, Jichang Town was also located in a small-scale saddle-shaped field region, which was obviously favorable for the convergence at low and middle levels, superimposed to the topographic upward motion. Therefore, the sudden severe torrential rain, resulting in the formation of landslides.

Key words: torrential rain, landslide, FY-4A

引言

我国夏季暴雨频发,对人民生命及财产安全造成了极大影响(陶诗言,1980;Li et al,2016;Fu et al,2016)。暴雨由中小尺度系统直接决定,但受多种尺度系统共同影响。而中尺度与大尺度动力学存在较大的不同,暴雨成因复杂(丁一汇和张建云,2009)。其中,突发性暴雨雨量大、局地性强、变化快且降水前环流特征不明显,增加了预报难度(黄仪方和琚建华,2002;王劲松等,2002;侯瑞钦等,2003)。

近年来,随着观测技术的进步,越来越多的学者投入到突发性暴雨事件的研究。肖递祥等(2012)对2011年7月四川盆地发生的两次(7月3日和23日)突发性暴雨过程展开了对比分析,发现两次过程均发生于高能不稳定的状态下。张雅斌等(2017)分析诊断了2014年8月12日陕西关中地区突发性暴雨过程,发现500 hPa内蒙古中部天气尺度横槽是突发性暴雨的直接影响系统,地面切变线是暴雨的触发条件。纪晓玲等(2007)利用常规气象资料分析了发生在宁夏2004年8月3日的突发性暴雨过程,主要影响系统为切变线和低涡,深厚的中低层辐合促进了不稳定能量的积累,也为短时强降水提供了动力抬升机制。慕建利等(2005)研究发现诱发2003年7月14—15日陕西地区突发性暴雨的天气系统为副热带高压及新疆干冷空气,700 hPa低涡、切变线是暴雨形成的触发机制。赵榆飞和杜继稳(2005)对比分析了陕北地区4次突发性暴雨和2次系统性暴雨过程,发现两者机理差别较大。突发性暴雨主要出现在副热带高压(以下简称副高)少动的天气形势下,水汽主要来源于暴雨发生前大气低层

的输送,上升运动与暴雨同步加强。而系统性暴雨则出现在副高位置变动较大的天气形势下,水汽主要来源于暴雨发生过程中的补充,垂直运动形成于暴雨发生之前。

张小玲等(2002)和贝耐芳等(2003)则对江淮地区造成暴雨的中尺度对流系统(MCS)展开研究,发现1998年7月武汉突发性特大暴雨是由沿低涡切变线相继生成的 β 中尺度对流系统所引发。在暴雨发生前,大气层结近乎整层饱和,并且蕴涵着大量对流有效位能,有利于暴雨的发生。暴雨发生过程中,高、低空正涡度区叠加、耦合,促进了低层切变线发展(冯伍虎和程麟生,2002),而低层切变线又进一步促进了MCS强烈发展。周文等(2020)对一次东移并引发强降水的高原对流云团展开分析,发现对流云团在不同阶段能量演变特征显著不同,强降水发生时,背景场对强降水的影响明显增强。

通过前人大量研究工作,人们对造成突发性暴雨的天气系统的认识在不断完善。除天气系统外,地形对暴雨的影响也尤为明显。地形的热力、动力作用可影响局地天气,极易诱发局地强降水(孙明生等,2013;赵玉春等,2012)。金少华等(2014)分析总结出700 hPa切变线移至云南后,受到地形阻挡,形成与山脉同向的切变线,中低层切变线为短时强降水提供了动力抬升机制。而冷锋则转变为静止锋。受冷空气影响,暖湿气流上升产生暴雨(许美玲等,2003;2013;纪晓玲等,2007)。

我国西南地区地处青藏高原东部,地质结构特殊,地形复杂。结合西南地区特殊的地质构造,在发生强降水之后容易诱发地质灾害,比如山体滑坡、泥石流、崩塌等(余峙丹和张辉,2008;马力等,2002;池再香等,2011)。西部山地突发性暴雨已然成为我

国重大自然灾害之一,其预警与防范是国家防灾减灾重大战略需求。因此,对西部山地突发性暴雨展开研究是十分有意义的。

本文结合中国气象局国家站及区域站小时降水量、高时空分辨率 ERA5 再分析资料(时间分辨率为 1 h,空间分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$)及 FY-4A 卫星相当黑体亮温(TBB)资料(时间分辨率为 5 min,空间分辨率为 4 km),从强降水对山体滑坡的影响、强降水成因以及 MCS 的演变等方面对 2019 年 7 月 23 日发生于贵州水城的一起特大型山体滑坡事件展开了研究,以期相关的科研、业务预报以及防灾减灾工作提供一定参考。

1 滤波器选择

本文选用陈忠明(1992)修订的 Barnes 带通滤波器,可更好排除高频和低频干扰。经过两次修订后的滤波器初值场函数 F_L 如下:

$$F_L(i, j) = F_1(i, j) + \frac{3}{4}[F_1(i, j) - F_0(i, j)] - \frac{\sum_{n=1}^N E_n(x, y)W_n}{\sum_{n=1}^N W_n}$$

第一次修订后的初值场

$$F_1(i, j) = F_0(i, j) + \frac{\sum_{n=1}^N D_n(x, y)W'_n}{\sum_{n=1}^N W'_n}$$

式中:

$$D_n(x, y) = F_n(x, y) - F_0(x, y)$$

$$W'_n = \exp[-r^2/(4Gc)]$$

由原始观测值确定的初值场

$$F_0(i, j) = \frac{\sum_{n=1}^N F_n(x, y)W_n}{\sum_{n=1}^N W_n}$$

式中:

$$W_n = \exp[-r_n^2/(4c)]$$

$$E_n(x, y) = F_1(x, y) - F_0(x, y)$$

式中: F 代表要素值, D_n 和 E_n 代表要素值与初值的差值, W 代表权重函数, r 代表测站与格点的距离。

修订后的滤波器响应函数 R_L 如下:

$$R_L = R_1 + (R_1 - R_0)(3/4 - R_0)$$

式中:

$$R_0 = \exp(-4\pi^2 c/\lambda^2)$$

$$R_1 = R_0(1 + R_0^{G-1} - R_0^G)$$

式中: λ 为波长, c 和 G 为滤波常数。滤波器的性能取决于 c 和 G 。当 G 取 0.35, c_1 、 c_2 分别取 5000 km 和 70000 km 时,最大响应波长为 500 km,可较好地保留 300~800 km 中尺度波动系统(图 1)。

2 灾情及降水概况

2.1 灾情

水城县是贵州省地质灾害多发、严重县区之一,地质灾害发生以自然因素为主(司江福等,2012)。据水城县人民政府网统计,截至 2019 年 7 月 23 日,水城县共有地质灾害隐患点 241 处。其中山体滑坡是水城县最主要的地质灾害类型,隐患点为 148 处,占 61.41%(图 2)。

据水城县人民政府网统计,2019 年贵州水城县一共发生了三起自然灾害,因灾死亡 43 人,失踪 9 人,伤病 11 人,紧急转移安置灾民 825 人。全年因灾造成直接经济损失 2.2165 亿元。

这三起自然灾害中,包含一起特大型山体滑坡事件。该事件发生于 2019 年 7 月 23 日 21 时贵州

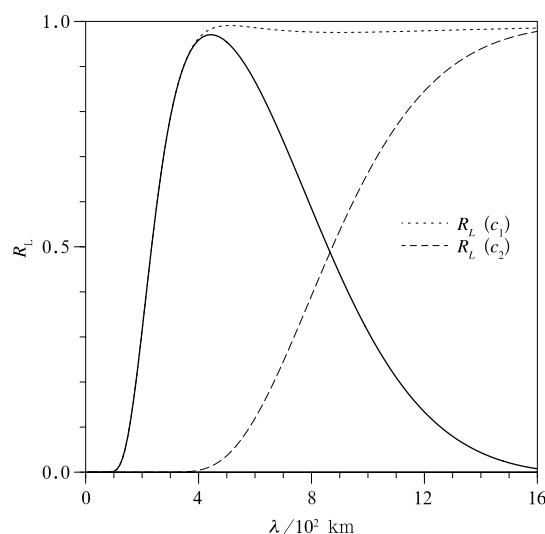


图 1 修订后的 Barnes 带通滤波
响应函数(实线)

(虚线为低通滤波响应函数)

Fig. 1 Revised Barnes filter response
function (solid line)

(Dashed line represents the low-pass
filter response function)

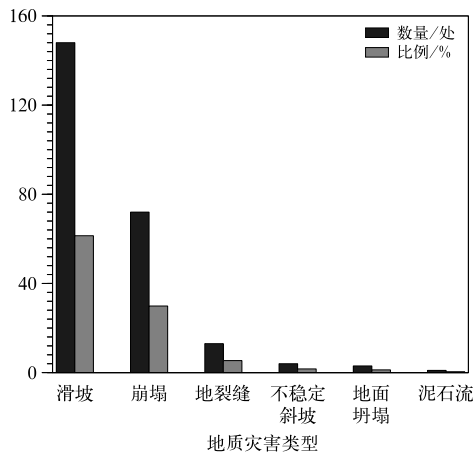


图2 水城县地质灾害隐患点概况

Fig. 2 Overview of sites with hidden perils for the geological hazards in Shuicheng County

省六盘水市水城县鸡场镇,灾害点位于 $26.2542^{\circ} \sim 26.2667^{\circ} \text{N}$ 、 $104.6667^{\circ} \sim 104.6750^{\circ} \text{E}$ 范围内。本次山体滑坡共造成近 1 600 人受灾,43 人死亡,还有 9 人失踪。2019 年水城县因灾造成的人员伤亡均发生于此次特大型山体滑坡事件中。此外,本次滑坡事件还造成 100 多间房屋倒塌,2 300 余间房屋遭到了不同程度损坏,造成直接经济损失达 1.9 亿元,占全年因灾损失的 85.72%。

水城县以山体滑坡为首的地质灾害多发情况,已严重制约了当地经济发展,威胁着人民生产生活及生命安全(司江福等,2012)。因此围绕“7·23”山体滑坡事件展开分析,对水城县防灾减灾是具有重要意义的。

综合降水量(图 3)和地形特点(图 4)来分析此次灾情。从地理位置而言,水城县位于贵州西部,地

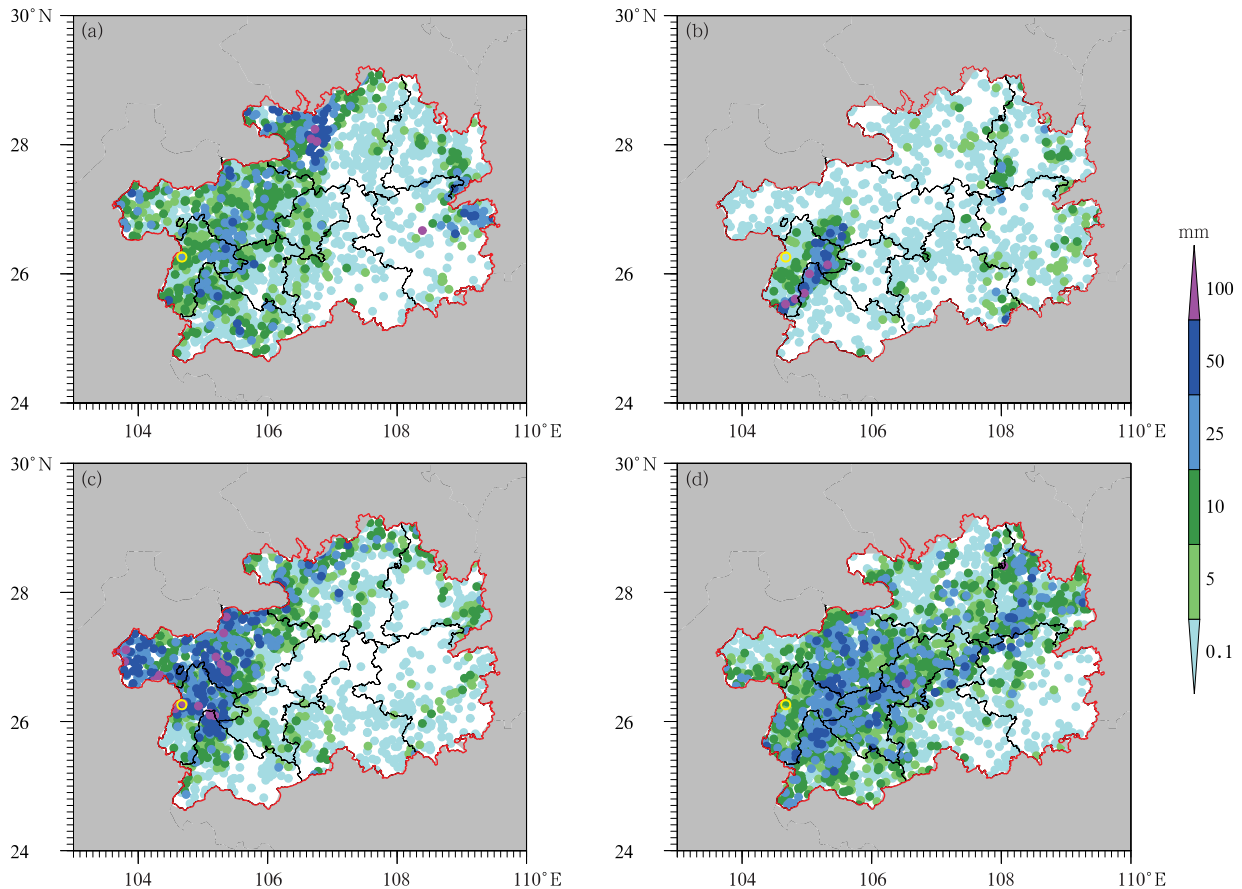


图3 2019年7月20—24日贵州省国家站及区域自动站24 h累计降水量分布

(a)20日08时至21日08时,(b)21日08时至22日08时,(c)22日08时至23日08时,(d)23日08时至24日08时
(黄色空心圆圈为鸡场镇灾害发生点)

Fig. 3 Distribution of 24 h accumulated precipitation at Guizhou national stations and regional stations from (a) 08:00 BT 20 to 08:00 BT 21, (b) 08:00 BT 21 to 08:00 BT 22, (c) 08:00 BT 22 to 08:00 BT 23, (d) 08:00 BT 23 to 08:00 BT 24 July 2019
(Yellow hollow circle represents the disaster spot in Jichang Town)

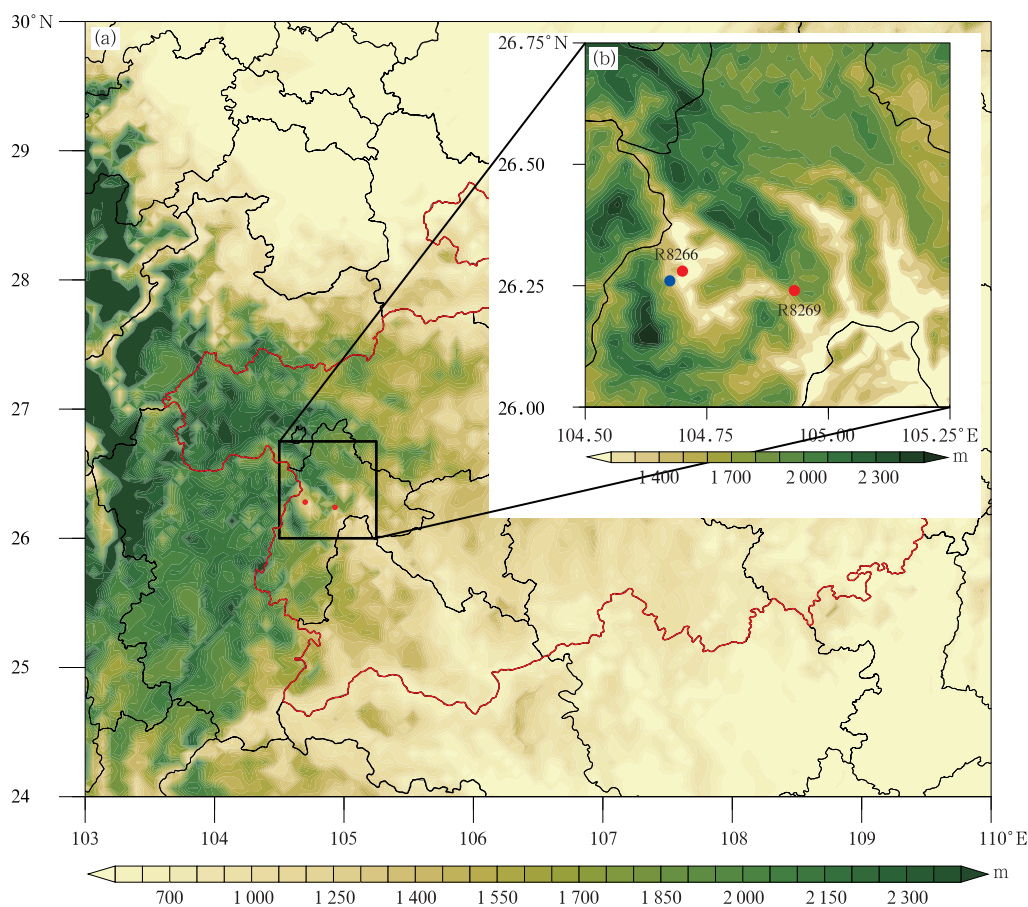


图 4 (a) 贵州省地形及(b)灾害点附近地形(填色)

(蓝点代表灾害点,红点为 2019 年 7 月 22 日 08 时至 23 日 08 时
水城县 24 h 累计降水量超过 100 mm 的观测站)

Fig. 4 (a) Terrain (colored) in Guizhou Province and (b) near the disaster spot
(Blue dot represents the disaster spot; red dots represent the regional stations with 24 h accumulated
precipitation exceeding 100 mm in Shuicheng from 08:00 BT 22 to 08:00 BT 23 July 2019)

处云贵高原中部斜坡及乌蒙山脉东侧。海拔高度 633~2861 m, 地形起伏大, 结构复杂(司江福等, 2012)。水城县是四周高、中间低的地形(图 4), 呈现为近似于西北—东南向断陷盆地特征。从图 3 中可以发现, 灾害点位于山坡处, 地势陡峭, 当发生强降水时, 雨水易向低地势处汇集。土体受到强烈冲刷, 为滑坡等地质灾害的发育提供了基本条件(肖攀等, 2015)。另一方面, 中国地震局地壳应力研究所调查发现鸡场镇发生山体滑坡的斜坡上存在多处古崩滑堆积体(<http://www.eq-icd.cn/Index/show/catid/248/id/4655.html>)。由于这些崩滑堆积体结构较为松散, 遇持续性降水或强降水后, 山体稳定性下降, 易引发山体滑坡。

2.2 贵州水城降水概况

21 日 08 时国家站 24 h 累计降水量显示西南地

区发生系统性降水(图略), 贵州西部受西南地区系统性降水影响。其中, 贵州省六盘水市水城县主要为中雨, 但是在水城县鸡场镇有大雨发生(图 3a)。该时段影响降水的天气系统主要为 700 hPa 低槽(图略)。随后 24 h 内, 低槽位置向北移动, 西南地区雨团随之北上。贵州地区系统性降水明显减弱, 仅六盘水市与黔西南交界处有一条东北—西南向的局地大暴雨带(图 3b)。紧接着在贵州西部有一低涡生成, 低槽南伸, 西南地区降水增强, 有大暴雨发生。其中, 鸡场镇附近存在一条东西向的大暴雨带(图 3c)。23 日 08 时至 24 日 08 时(北京时, 下同)期间, 低涡向东南移动, 700 hPa 低槽向东南伸展, 云南降水增强(图略), 贵州降水范围扩大, 但强度减弱(图 3d), 鸡场镇降水转为中雨。贵州水城山体滑坡事件正发生于此时段。

研究表明, 在引发山体滑坡的众多因素中, 降水

是触发山体滑坡发生的主要原因之一(马力等, 2008)。一方面,发生强降水后,土壤吸水,坡体自重增加;另一方面,降水可软化坡体的滑动面,坡体抗剪强度随之降低(李向红等, 2013)。结合图 3,山体滑坡事件发生当天以及前几天,水城县均有降水发生(并且有大暴雨发生)。因此推断降水或为本次山体滑坡的重要影响因素。为了验证这一推断,我们对灾害点附近降水概况展开了分析。

2.3 鸡场镇降水概况

2019 年 7 月 22 日 08 时至 23 日 08 日期间,水城县 24 h 累计降水量超过 100 mm(大暴雨量级)的站点有 2 个(如图 4 红点所示),站号为 R8266 和 R8269。其中 R8266 测站距离鸡场镇坪地村山体滑坡点(如图 4 中蓝点所示)更近。后续主要围绕该观测站展开分析。

7 月 1 日 00 时至山体滑坡当日,鸡场镇 7 月累计降水量达到了 288.9 mm(如图 5 蓝色实线所示),降水主要在中旬发生。而 7 月中旬开始,鸡场镇雨量开始增多。如图中红色虚线所示,山体滑坡发生前 10 天累计降水量已达到 236.9 mm。其中,在灾情发生 24 h 内有短时强降水发生,集中于 22 日 20 时至 23 日 04 时,最大小时降水量甚至达到了 56.9 mm(22 日 22 时)。因此后续分析中将围绕这一时段展开研究。

需要注意的是,强降水于 23 日凌晨结束,但山体滑坡并未随即发生,而是在 23 日夜间发生,滞后

约 16 h。这是因为降水进入土体后,需要时间累积其对滑动面的润滑、软化作用。因此,有相当数量的山体滑坡事件并不是在强降水结束后立马发生的,而是一般发生于强降水结束后的几天内(马力等, 2008)。

2.4 对流云团发生发展分析

影响本次强降水的对流云团是贵州西北部 MCS 与高原东移 MCS 合并之后发展演变而成(图略)。本文主要关注短时强降水时段前后贵州西北部 MCS 演变特征。

22 日 18:15 对流云团主体位于四川盆地,呈椭圆形,主要受西南涡影响。在贵州西北部低空切变线影响下,从四川盆地云团主体南部延伸出一条东北—西南向对流云带。切变线附近 TBB 达到 -72°C 以下,对流活动较强,贵州西北部地区产生降水(图略)。鸡场镇位于 -72°C TBB 南端,对流活动较其北部偏弱。此时鸡场镇相对湿度较低,未产生降水。随着四川盆地西南涡减弱,贵州西北部切变线也减弱,进而导致切变线云带对流活动减弱(图 6b)。由于贵州西部有低涡形成,因此局地对流活动增强。鸡场镇上空 21:53 形成了 $TBB < -82^{\circ}\text{C}$ 的对流云活动区,对流活动区呈东西向(图 6c),与 22 日鸡场镇大暴雨带位置及走向基本一致(图 3c)。约 22:15 之后,鸡场镇对流强度开始减弱(图略)。但是在降水期间, TBB 仍维持在 -62°C 以下(图 6d),有利于降水的维持。

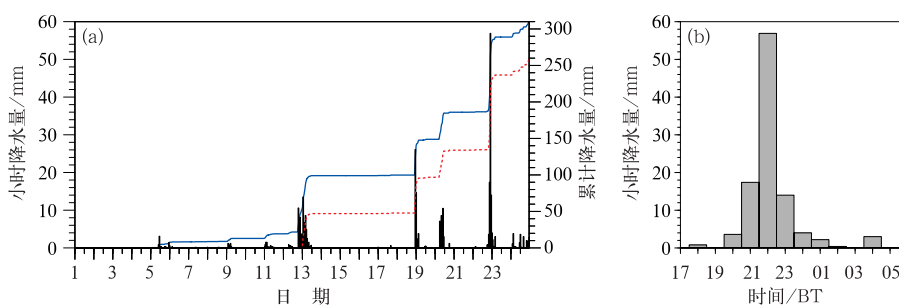


图 5 水城县 R8266 区域自动站 2019 年 7 月(a)1—24 日逐时降水概况(黑色柱)及累计降水量(蓝色实线代表从 1 日 00 时开始计算的累计降水量,红色虚线代表从 13 日 00 时开始计算的累计降水量);
(b)22 日 17 时至 23 日 06 时逐时降水

Fig. 5 (a) Hourly precipitation (black bar) and accumulated precipitation at the R8266 Regional Station in Shuicheng from 1 to 24 July 2019 (blue solid line; accumulated precipitation calculated from 00:00 BT 1 July, red dotted line; accumulated precipitation calculated from 00:00 BT 13 July), and (b) hourly precipitation from 17:00 BT 22 to 06:00 BT 23 July 2019

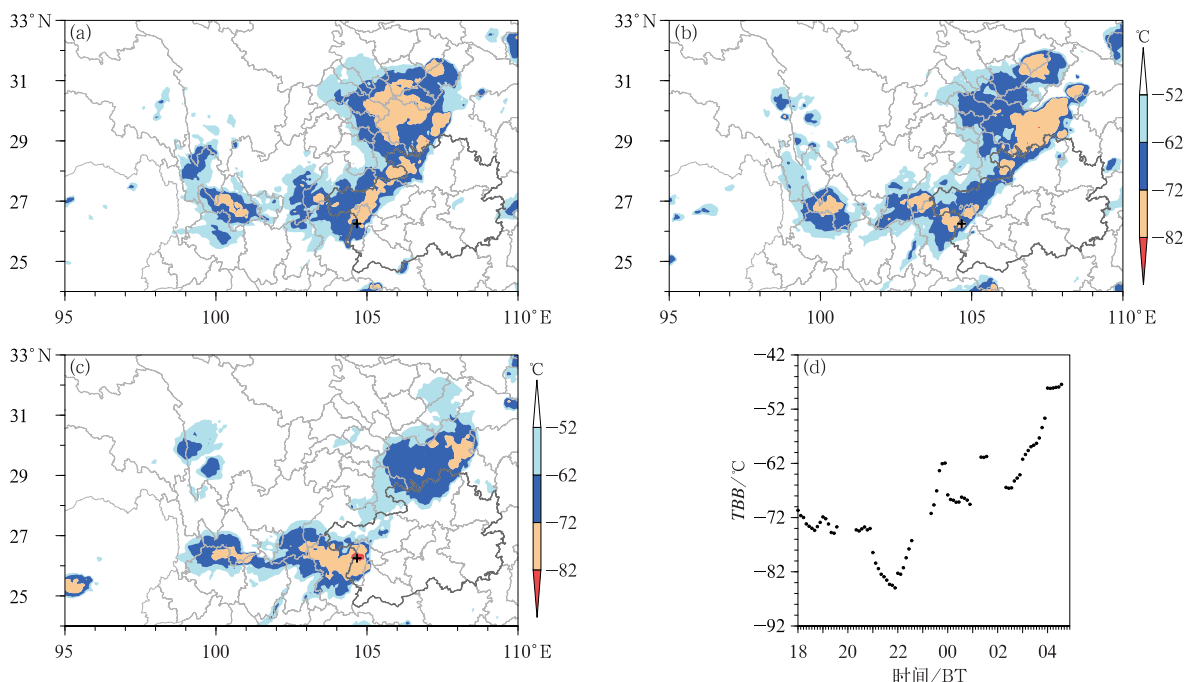


图 6 FY-4A 在 2019 年 7 月 22 日 (a)18:15, (b)19:38, (c)21:53 的 TBB 水平分布 (“+”代表灾害点);

(d)灾害点处在 22 日 18:15 至 23 日 04:53 期间的 TBB 时间序列

Fig. 6 Horizontal distribution of TBB by FY-4A at 18:15 BT (a), 19:38 BT (b), 21:53 BT (c)

22 July 2019 (+: disaster spot); (d) time series of TBB over the disaster spot

from 18:15 BT 22 to 04:53 BT 23 July 2019

3 气象条件分析

3.1 四川盆地北部冷锋对鸡场镇降水的影响

22 日 08 时(图 7a), 北方冷空气南下, 在四川盆地北部形成冷锋。锋前暖湿气流受锋面南压影响, 沿锋面爬升。22 日 14 时(图 7b), 地面锋线已到达四川盆地内。锋后干冷空气沿四川盆地北边界滑入盆底, 强迫盆地内气流向南运动。导致暴雨发生前四川盆地内高能区向贵州暴雨区伸展(图 7d)。因此, 鸡场镇低层假相当位温不断升高, 于 17 时达到最强(图 7d), 假相当位温最大可超过 363 K。四川盆地向南移动的高能气团为灾害点暴雨发生蓄积了能量。突发性暴雨发生前(20 时之前), 鸡场镇上空假相当位温随高度减小, 大气层结为对流性不稳定。由此可见, 四川盆地内受冷锋南压影响而向南运动的气流为贵州地区强降水发生提供了前期热力条件。

除此之外, 四川盆地内受冷锋强迫向南运动的气流对贵州地区降水还存在动力抬升影响。当地面

锋线进入四川盆地后, 盆地内气流北风分量增强。气流经过四川盆地南边界时, 受地形阻挡, 气流爬坡。因此在盆地南边界附近开始形成较强的上升气流(图 7b)。随着盆地内锋区继续南压, 四川盆地南边界的上升支也随之向南移动。当上升支移至贵州时, 降水发生(图 7c)。但冷锋南压带来的动力强迫仅在降水初期有较明显的影响。降水最强的时候, 鸡场镇上升运动主要受到局地气旋性环流影响。

3.2 大暴雨日形势场分析

22 日整体形势如下: 对流层中层, 原贵州西北部 500 hPa 高空槽发展、南伸, 有形成高空气旋的趋势。高空槽发展促使副高东退。贵州西部受 500 hPa 高空槽与副高外围偏东气流控制(图 8a)。700 hPa 上, 鸡场镇在 21 日位于低槽后(图略), 主要受偏西风影响, 因此天气晴好(图 3b)。22 日, 贵州西部与云南交界处, 局地气旋性环流增强, 有低涡(26.5°N、103.5°E)形成, 鸡场镇受西南气流控制。在 700 hPa 低槽、四川盆地西南涡影响下, 贵州西北部形成东北—西南向切变线。另一方面, 贵州西北部比湿较前一日明显增加(图 8b)。22 日贵州地区, 水汽通量

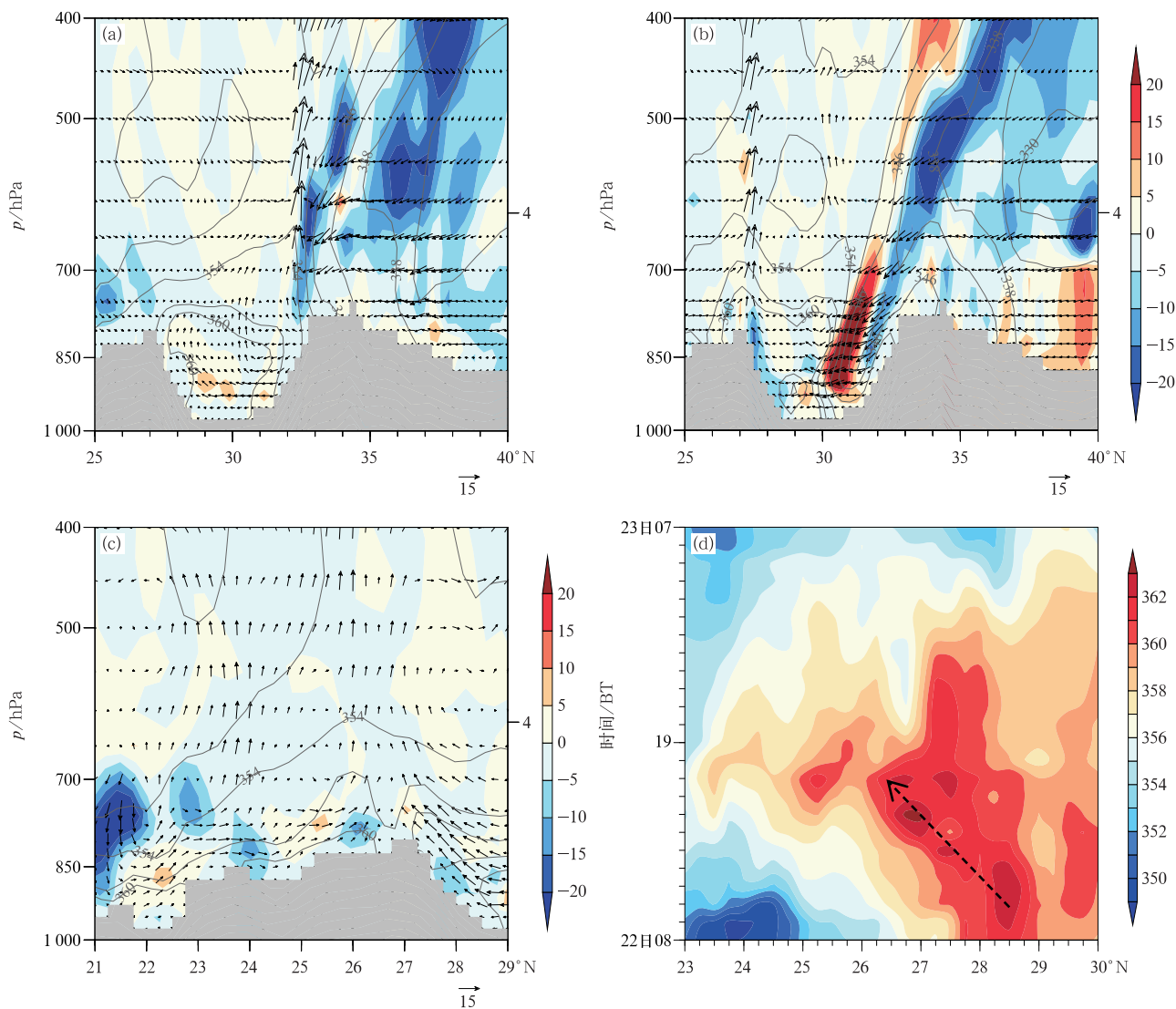


图7 2019年7月22日(a)08时,(b)14时,(c)20时鸡场镇温度平流(填色,单位: $10^{-5} \text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$),假相当位温(实线,单位:K)、风场($v-w$,单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)经向剖面;(d)22日08时至23日07时在775 hPa高度上沿 $104.50^{\circ} \sim 104.75^{\circ}\text{E}$ 经向平均假相当位温(单位:K)时间-纬度剖面
(图7d中带箭头的虚线指示盆地内高能气团向鸡场镇伸展)

Fig. 7 Meridional section of temperature advection (colored, unit: $10^{-5} \text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$), potential pseudo-equivalent temperature (solid line, unit: K) and wind field ($v-w$, unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) at 08:00 BT (a), 14:00 BT (b), 20:00 BT (c) 22 July 2019; (d) time-height cross-section of potential pseudo-equivalent temperature (unit: K) at 775 hPa along Jichang Town from 08:00 BT 22 to 07:00 BT 23 July 2019
(Dash line with arrow represents the air with large energy flow from the basin to Jichang Town in Fig. 7d)

显著辐合(图8c),有利于大暴雨的产生。

降水开始前,低层偏南风为降水区输送暖湿气(图10a),700 hPa 之上有强辐散场,以下有强辐合场,促进了低层上升运动的增强(图10b)。降水初期(22日20时)上升运动主要位于700 hPa 以下(图10b)。就800 hPa 而言,22日20时槽前偏南风

与四川盆地偏北风在贵州西北部形成切变线(图9e 黑色实线),切变线南端有强降水产生。此时,鸡场镇近地面层风向转为偏东风(图9e 红色框所示)。受鸡场镇西高东低地形影响,偏东气流爬坡,有利于上升运动的形成,为降水发生提供动力条件。贵州与云南交界处在750 hPa 形成中尺度辐合中心(图9b),

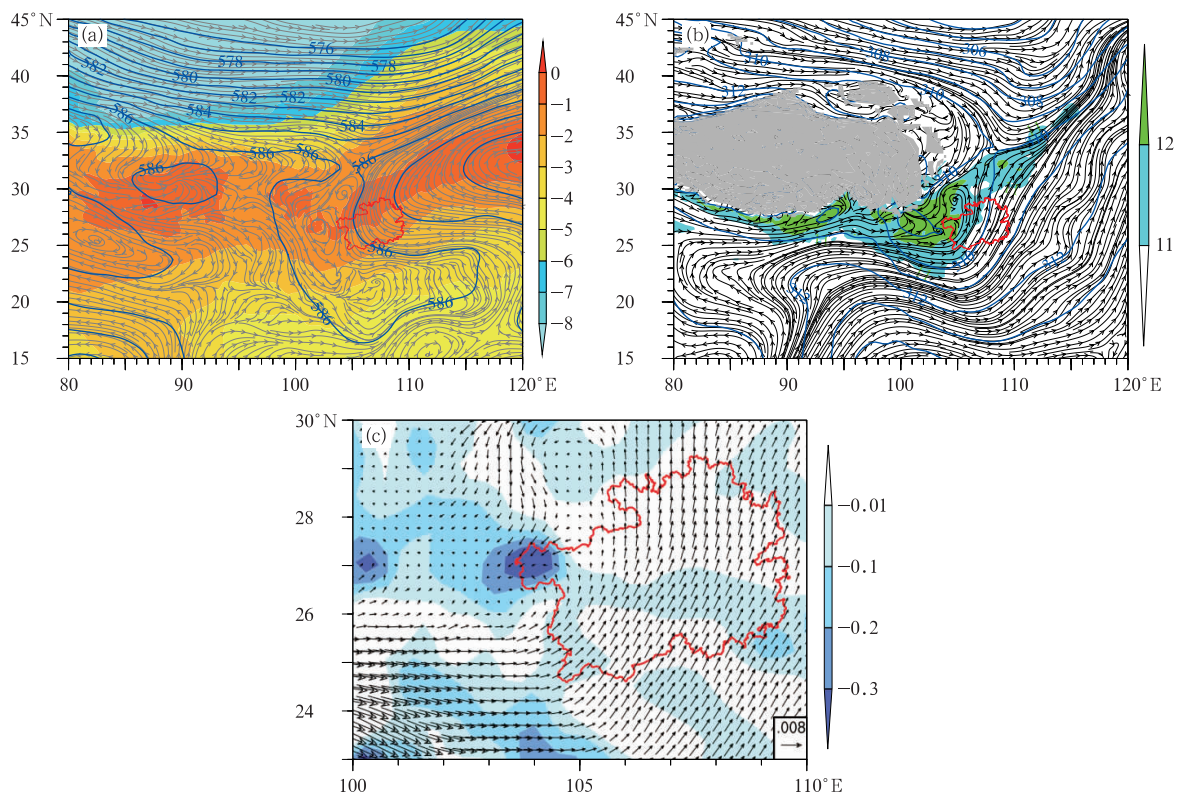


图 8 2019 年 7 月 22 日 (a) 日平均 500 hPa 流场、位势高度(蓝线, 单位: dagpm)及温度场(填色, 单位: $^{\circ}\text{C}$), (b) 700 hPa 流场、位势高度(蓝线, 单位: dagpm)及比湿场(填色, 单位: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$), (c) 整层水汽通量(箭头, 单位: $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)、及其散度场(填色, 单位: $10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)

Fig. 8 (a) Daily average 500 hPa stream field, geopotential height (blue line, unit: dagpm) and temperature field (colored, unit: $^{\circ}\text{C}$), (b) 700 hPa stream field, geopotential height (blue line, unit: dagpm) and specific humidity field (colored, unit: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$), and (c) entire layer water vapor flux (arrow, unit: $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$) and its divergence field (colored, unit: $10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) on 22 July 2019

700 hPa 对应有低涡形成(图 9a), 切变线沿低涡向东北伸展。鸡场镇位于低涡东北部, 位于气流辐合区。降水初期, 低层辐合开始向中层延伸, 高层辐散同时增强, 有利于强降水发生(图 10b)。鸡场镇降水在 22 时最强, 贵州西部 700 hPa 低涡消亡, 与高原东南部低槽合并, 鸡场镇位于槽前(图 9c, 9d), 气旋性环流达到最强(图 10a)。此时应是中低层辐合上升运动增强带来大范围的降水发生, 但实际降水区域只发生在气旋性环流内较狭窄的带中。通过 Barnes 带通滤波后, 最强降水发生时鸡场镇附近流场变化显著。贵州西部分离出气旋, 北部有反气旋。鸡场镇位于滤波后的鞍形场中(图 9f), 叠加地面偏东风流遇到山脉阻挡形成的上升运动, 导致最强降水发生。

3.3 大暴雨日物理量场分析

从图 10a 可以发现, 22 日 08 时鸡场镇 700 hPa 以下受西南风控制, 配合四川盆地向南流动的高能暖湿气流, 鸡场镇假相当位温开始增加。随后, 中低层南风分量逐渐增加, 水汽通量也随之增强, 低层相对湿度不断增加(图 10c)。19 时, 受贵州西部气旋性环流增强的影响, 低层已转变为东南风。20 时, 鸡场镇附近偏东风流增强导致的地形辐合增强(图 10b), 有利于上升运动的维持。从图 10b 可以发现, 降水初期低层辐合、高层辐散增强, 整层均为强上升运动。除此之外, 20 时水汽通量达到最强, 650 hPa 高度附近大气相对湿度超过 95%, 又由于鸡场镇上空为对流不稳定层结, 受到动力条件触发,

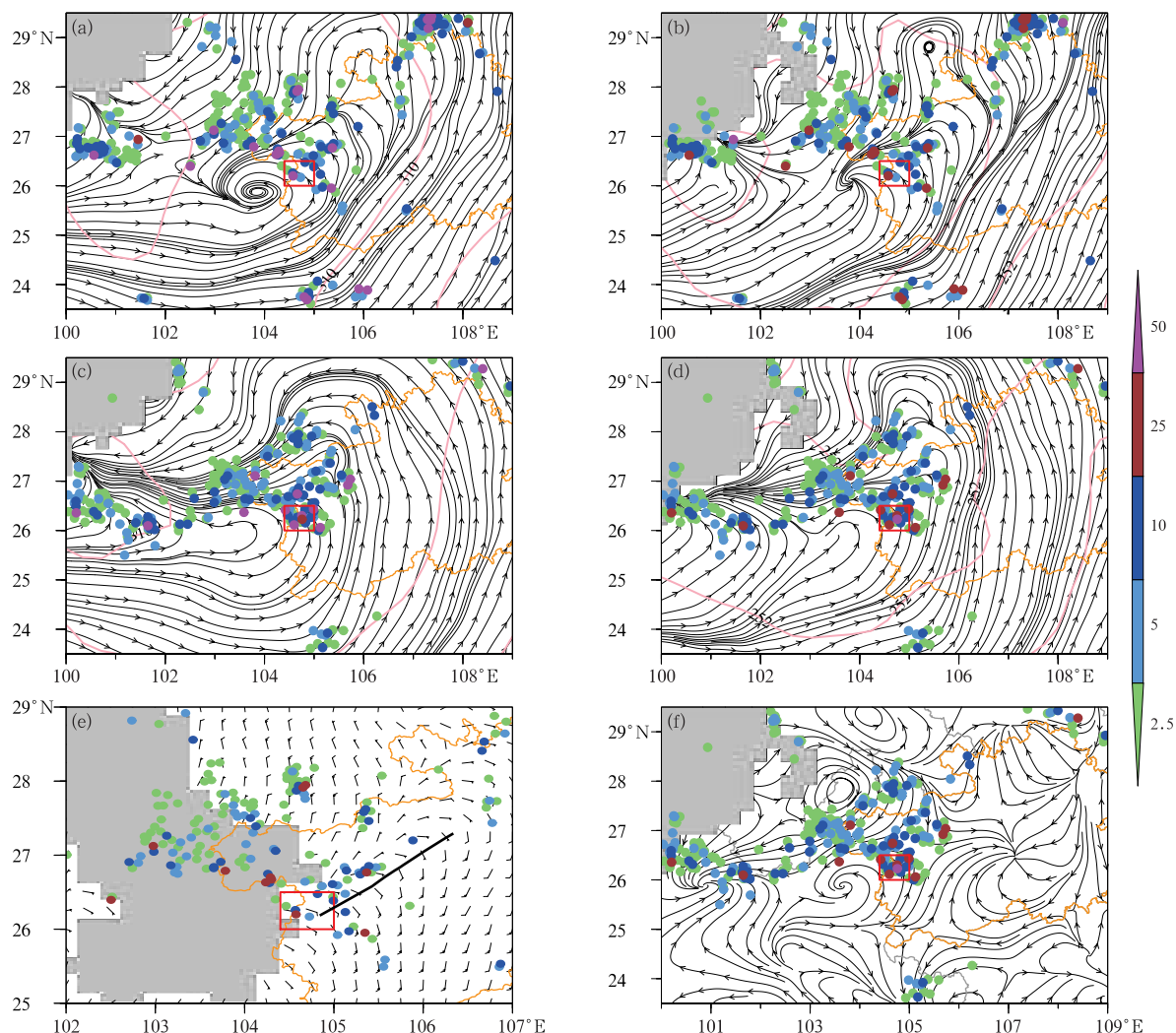


图9 2019年7月22日(a,b)20时和(c,d)22时(a,c)700 hPa及(b,d)750 hPa 流场、小时降水量(圆点, 单位:mm);(e)20时 800 hPa 风场、小时降水量(圆点,单位:mm),(f)22时 750 hPa 滤波后的流场、小时降水量(圆点,单位:mm)
(红色方框代表灾害点及其附近区域;图9e中的黑色实线代表切变线)

Fig. 9 Stream field and hourly precipitation (dots, unit: mm) at (a, c) 700 hPa and (b, d) 750 hPa at (a, b) 20:00 BT and (c, d) 22:00 BT 22 July 2019; (e) wind and hourly precipitation at 800 hPa (dots, unit: mm) at 20:00 BT and (f) stream field at 750 hPa after Barnes filtering and hourly precipitation (dots, unit: mm) at 22:00 BT 22 July 2019
(Red boxes represent disaster sites and its near area; black solid line represents shear line in Fig. 9e)

开始产生降水(崔春光等, 2008)。但 20 时大气饱和层相对浅薄(图 10c)。随着降水的发生, 能量释放, 假相当位温开始减小(图 10a)。20 时气旋性环流达到最强(图 10a), 湿层增厚, 配合强水汽通量及强上升运动, 产生最强降水。至暴雨结束时, 鸡场镇上空仅低层维持有弱上升气流, 因此降水显著减弱。

从相对湿度时间-高度剖面图(图 10c)还可以发现, 22 日降水开始前, 低层相对湿度及比湿均增加,

而高层相对湿度及比湿减小, 增强了大气层结的对流性不稳定(崔春光等, 2008), 有利于降水的发生。为了进一步验证 22 日大气层结稳定度演变特征, 我们还引入了对流稳定度指数(I), 通常 I 为 500 hPa 假相当位温及 850 hPa 假相当位温的差值。当 $I > 0$ 时, 大气层结为对流稳定层结; 当 $I < 0$ 时, 为对流不稳定层结; 并且 I 越小表示层结越不稳定(刘建文等, 2005)。由于贵州西部地形较高, 为了避免地形

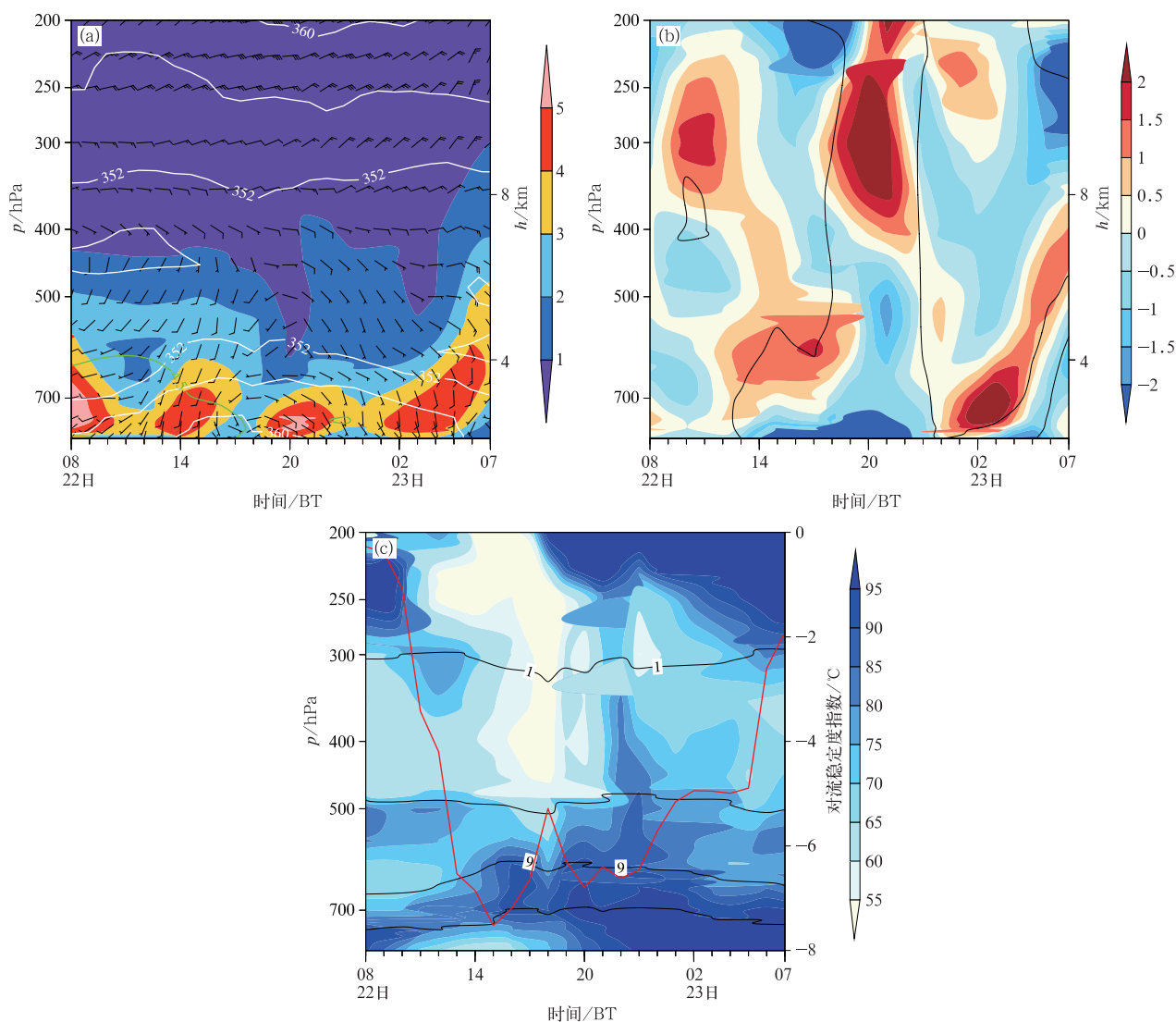


图 10 2019 年 7 月 22 日 08 时至 23 日 07 时鸡场镇(a)水汽通量(填色,单位: $\text{kg} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1}$)、水平风场(风羽)、假相当位温(白线,单位:K)及涡度(绿线,单位: 10^{-5} s^{-1}), (b)散度场(填色,单位: 10^{-5} s^{-1})及垂直速度(黑线, $\omega \leq -0.1 \text{ Pa} \cdot \text{s}^{-1}$), (c)相对湿度(填色,单位:%)、比湿(黑线,单位: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)及修正后的对流稳定度指数(红线,单位: $^{\circ}\text{C}$)时间-高度剖面

Fig. 10 Time-height cross-sections of (a) water vapor flux (colored, unit: $\text{kg} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1}$), horizontal wind (wind bar), potential pseudo-equivalent temperature (white line, unit: K) and vorticity (green line, unit: 10^{-5} s^{-1}), (b) divergence field (colored, unit: 10^{-5} s^{-1}) and vertical velocity (black line, $\omega \leq -0.1 \text{ Pa} \cdot \text{s}^{-1}$), and (c) relative humidity (colored, unit: %), specific humidity (black line, unit: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$) and revised convection stability index (red line, unit: $^{\circ}\text{C}$) at Jichang Town from 08:00 BT 22 to 07:00 BT 23 July 2019

带来的误差,我们引入了朱莉等(2013)修正后的对流稳定度指数(I_{con}),选取为 350 hPa 假相当位温与 700 hPa 假相当位温的差值($I_{\text{con}} = \theta_{\text{sc}350} - \theta_{\text{sc}700}$)。朱莉等(2013)研究表明,修正后的对流稳定度指数对强对流暴雨的预报同样具备较好的指示意义。从图

10c 可以发现,22 日 09 时对流稳定度指数骤减。至 22 日 15 时达到最低,此时 $I_{\text{con}} < -7^{\circ}\text{C}$,表明降水发生前对流不稳定达到最强。随后对流稳定度指数开始小幅增加,在强降水期间维持在 $-7 \sim -5^{\circ}\text{C}$,对流不稳定性开始减弱。至暴雨结束后, I_{con} 显著增加,

大气层结不稳定性进一步减弱。

4 结论与讨论

本文利用地面站降水资料、高时空分辨率的 ERA5 再分析资料及 FY-4A 卫星 TBB 资料,对 2019 年 7 月 23 日引发贵州水城鸡场镇山体滑坡的大暴雨成因展开分析。得出以下主要结论:

影响本次突发性暴雨的主要天气系统为四川盆地北部冷锋、贵州西部低涡及 750~700 hPa 低槽。四川盆地北部冷锋南压为贵州水城降水发生提供了热力和动力条件;冷锋南下,迫使四川盆地内高能气团向南流动。结合低槽西南暖湿气流影响,增强了鸡场镇低层大气层结对流不稳定性。降水初期低层偏东气流受地形阻挡而产生的地形性上升运动、贵州西部低涡及低槽为降水发生进一步提供有利的动力条件。在前期水汽聚积条件下,22 时湿层增厚。配合低槽前上升运动,促使鸡场镇对流发展,能量释放,从而造成强降水发生。通过 Barnes 带通滤波分析,鸡场镇位于滤波后的鞍形场附近,有利于强对流天气的形成。通过 FY-4A 高时空分辨率云图可以发现,贵州水城大暴雨带是 $TBB < -82^{\circ}\text{C}$ 对流云团造成的。

需要指出的是本文仅是对一次强降水致灾过程分析研究。而强降水变化复杂,降水的演变特征、发展机理及其引发的地质灾害类型均有差别。因此,将来还需开展更多相关研究工作,以期对防灾减灾工作提供更有价值的参考。

参考文献

- 贝耐芳,赵思雄,高守亭,2003. 1998 年“二度梅”期间武汉—黄石突发性暴雨的模拟研究[J]. 大气科学,27(3):399-418. Bei N F, Zhao S X, Gao S T, 2003. A numerical simulation of sudden heavy rainfall occurred in Wuhan and Huangshi during July of 1998[J]. Chin J Atmos Sci, 27(3):399-418(in Chinese).
- 陈忠明,1992. 气象场中尺度带通滤波方法研究[J]. 气象学报,50(4):504-510. Chen Z M, 1992. Study of mesoscale band-pass filtering method for meteorological fields[J]. Acta Meteor Sin, 50(4):504-510(in Chinese).
- 池再香,邱斌,康学良,等,2011. 一次南支槽背景下地形对贵州水城南部特大暴雨的作用[J]. 大气科学学报,34(6):708-716. Chi Z X, Qiu B, Kang X L, et al, 2011. The effect of topography on heavy torrential rain in the background of a south branch trough in Shuicheng of Guizhou Province[J]. Trans Atmos Sci, 34(6):708-716(in Chinese).

- 崔春光,李红莉,彭菊香,等,2008. LAPS 资料在一次鄂东初夏暴雨分析中的应用[J]. 暴雨灾害,27(4):307-312. Cui C G, Li H L, Peng J X, et al, 2008. The application of LAPS data to research a heavy rain in East Hubei Province in the early summer of 2008 [J]. Torr Rain Dis, 27(4):307-312(in Chinese).
- 丁一汇,张建云,2009. 暴雨洪涝[M]. 北京:气象出版社. Ding Y H, Zhang J Y, 2009. Rainstorm and Flood [M]. Beijing: China Meteorological Press(in Chinese).
- 冯伍虎,程麟生,2002. “98. 7”突发性特大暴雨中尺度切变线低涡发展的涡源诊断[J]. 高原气象,21(5):447-456. Feng W H, Cheng L S, 2002. Vorticity source diagnoses for the development of mesoscale low vortex with shearline during “98. 7” abruptly extraordinary heavy rainstorm[J]. Plateau Meteor, 21(5):447-456 (in Chinese).
- 侯瑞钦,程麟生,冯伍虎,2003. “98. 7”特大暴雨低涡的螺旋度和动能诊断分析[J]. 高原气象,22(2):202-208. Hou R Q, Cheng L S, Feng W H, 2003. Diagnostic analysis of the helicity and kinetic energy for a low vortex of “98. 7” extraordinary heavy rainfall [J]. Plateau Meteor, 22(2):202-208(in Chinese).
- 黄仪方,琚建华,2002. 压能、湿焔场与暴雨落区的诊断分析[J]. 高原气象,21(2):154-158. Huang Y F, Ju J H, 2002. Diagnostic analysis on pressure energy, moist enthalpy and occurrence of heavy rainfall[J]. Plateau Meteor, 21(2):154-158(in Chinese).
- 纪晓玲,胡文东,刘庆军,等,2007. 宁夏一次突发性暴雨中小尺度系统分析[J]. 宁夏大学学报(自然科学版),28(1):32-36. Ji X L, Hu W D, Liu Q J, et al, 2007. Analysis on mesoscale systems of a sudden heavy rainstorm in Ningxia [J]. J Ningxia University (Natural Science Edition), 28(1):32-36(in Chinese).
- 金少华,周泓,艾永智,2014. 云南哀牢山东侧一次突发性暴雨过程诊断分析[J]. 气象,40(11):1345-1353. Jin S H, Zhou H, Ai Y Z, 2014. Diagnostic analysis on sudden rainstorm process on east side of Ailao Mountain[J]. Meteor Mon, 40(11):1345-1353(in Chinese).
- 李向红,赵洁妮,伍静,等,2013. 桂林“5. 9”山体滑坡的暴雨成因分析[J]. 灾害学,28(3):95-99. Li X H, Zhao J N, Wu J, et al, 2013. Analysis on the heavy rain causes of the landslide on May 5th in Guilin City[J]. J Catastrophol, 28(3):95-99(in Chinese).
- 刘建文,郭虎,李耀东,等,2005. 天气分析预报物理量计算基础[M]. 北京:气象出版社. Liu J W, Guo H, Li Y D, et al, 2005. The Fundamental Physiscal Calculation of Weather Analysis Forecast[M]. Beijing: China Meteorological Press(in Chinese).
- 马力,游扬声,缪启龙,2008. 强降水诱发山体滑坡预报[J]. 山地学报,26(5):583-589. Ma L, You Y S, Miao Q L, 2008. The research of Landslip forecast reduced by strong precipitation[J]. J Mount Sci, 26(5):583-589(in Chinese).
- 马力,曾祥平,向波,2002. 重庆市山体滑坡发生的降水条件分析[J]. 山地学报,20(2):246-249. Ma L, Zeng X P, Xiang B, 2002. Relationship between the slope slides and precipitation in Chongqing[J]. J Mt Sci, 20(2):246-249(in Chinese).
- 慕建利,杜继稳,张弘,等,2005. 一次诱发山地灾害突发性暴雨数值模拟及诊断分析[J]. 气象,31(12):36-40. Mu J L, Du J W,

- Zhang H, et al, 2005. Numerical simulation and diagnostic analysis of abrupt heavy rain event inducing mountainous disaster [J]. Meteor Mon, 31(12): 36-40 (in Chinese).
- 司江福, 尹海洋, 黎富当, 等, 2012. 贵州水城县地质灾害特征、成因及防治对策[J]. 中国地质灾害与防治学报, 23(1): 111-115. Si J F, Yin H F, Li F D, et al, 2012. Characteristics and causes of geological hazards and the preventive measures in Shuicheng, Guizhou, China [J]. Chin J Geol Hazard Control, 23(1): 111-115 (in Chinese).
- 孙明生, 杨力强, 尹青, 等, 2013. “7·21”北京特大暴雨成因分析(II): 垂直运动、风垂直切变与地形影响[J]. 暴雨灾害, 32(3): 218-223. Sun M S, Yang L Q, Yin Q, et al, 2013. Analysis on the cause of a torrential rain occurring in Beijing on 21 July 2012 (II): vertical motion, wind vertical shear and terrain effect [J]. Torr Rain Dis, 32(3): 218-223 (in Chinese).
- 陶诗言, 1980. 中国之暴雨[M]. 北京: 科学出版社: 1-225. Tao S Y, 1980. Heavy Rain in China [M]. Beijing: Science Press: 1-225 (in Chinese).
- 王劲松, 李耀辉, 康凤琴, 等, 2002. 西北区东部一次暴雨的数值模拟试验[J]. 高原气象, 21(3): 258-266. Wang J S, Li Y H, Kang F Q, et al, 2002. Numerical simulation experiment of torrential rain event in east of North-West China [J]. Plateau Meteor, 21(3): 258-266 (in Chinese).
- 肖逸祥, 杨康权, 祁生秀, 2012. 2011年7月四川盆地两次突发性暴雨过程的对比分析[J]. 气象, 38(12): 1482-1491. Xiao D X, Yang K Q, Qi S X, 2012. Comparative analysis of two abrupt heavy rain processes in Sichuan Basin in July 2011 [J]. Meteor Mon, 38(12): 1482-1491 (in Chinese).
- 肖攀, 万军伟, 喻望, 2015. 贵州水城盆地岩溶地面塌陷成因分析及防治对策[J]. 桂林理工大学学报, 35(2): 263-268. Xiao P, Wan J W, Yu W, 2015. Cause and countermeasures of karst ground collapse in Shuicheng Basin [J]. J Guilin Univ Technol, 35(2): 263-268 (in Chinese).
- 许美玲, 段旭, 施晓辉, 等, 2003. 突发性暴雨的中尺度对流复合体环境条件的个例分析[J]. 气象科学, 23(1): 84-91. Xu M L, Duan X, Shi X H, et al, 2003. An environmental condition analysis on mesoscale convective complex of spate [J]. Sci Meteor Sin, 23(1): 84-91 (in Chinese).
- 许美玲, 尹丽云, 金少华, 等, 2013. 云南突发性特大暴雨过程成因分析[J]. 高原气象, 32(4): 1062-1073. Xu M L, Yin L Y, Jin S H, et al, 2013. Analysis on formation reason of sudden torrential rainstorm in Yunnan Province [J]. Plateau Meteor, 32(4): 1062-1073 (in Chinese).
- 余峙丹, 张辉, 2008. 云贵高原楚雄滑坡灾害与降水关系分析和预报[J]. 高原山地气象研究, 28(1): 57-61. Yu Z D, Zhang H, 2008. The analysis and forecast on the relationship between the landslide disaster and the precipitation in Chuxiong [J]. Plateau Mt Meteor Res, 28(1): 57-61 (in Chinese).
- 张小玲, 陶诗言, 张庆云, 2002. 1998年7月20~21日武汉地区梅雨锋上突发性中- β 系统的发生发展分析[J]. 应用气象学报, 13(4): 385-397. Zhang X L, Tao S Y, Zhang Q Y, 2002. An analysis on development of meso- β convective system along Meiyu front associated with flood in Wuhan in 20-21 July 1998 [J]. J Appl Meteor Sci, 13(4): 385-397 (in Chinese).
- 张雅斌, 马晓华, 薛湛彬, 等, 2017. “0812”关中盛夏突发性暴雨中尺度特征分析[J]. 热带气象学报, 33(2): 187-200. Zhang Y B, Ma X H, Xue Z B, et al, 2017. Mesoscale characteristic analysis on the “0812” abrupt rainstorm at Guanzhong in midsummer [J]. J Trop Meteor, 33(2): 187-200 (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): 607-616. Zhao Y C, Xu X F, Cui C G, 2012. A study of convective rainstorms along the east slope of Western Sichuan Plateau [J]. Climatic Environ Res, 17(5): 607-616 (in Chinese).
- 赵榆飞, 杜继稳, 2005. 陕北地区突发性暴雨和系统性暴雨的对比分析[J]. 气象科技, 33(5): 413-418. Zhao Y F, Du J W, 2005. Comparative analysis of abrupt and systematical heavy rainfall in Northern Shaanxi Province [J]. Meteor Sci Technol, 33(5): 413-418 (in Chinese).
- 周文, 王晓芳, 傅慎明, 等, 2020. 引发强降水的一次东移高原云团的能量演变特征研究[J]. 大气科学, 44(4): 885-898. Zhou W, Wang X F, Fu S M, et al, 2020. Energy evolution characteristics of an eastward-moving convective cloud cluster originating from the Tibetan Plateau that produces heavy precipitation [J]. Chin J Atmos Sci, 44(4): 885-898 (in Chinese).
- 朱莉, 张腾飞, 尹丽云, 等, 2013. 2010年云南“6.25”特大暴雨中尺度特征及成因的数值模拟分析[J]. 云南大学学报(自然科学版), 35(S1): 172-182, 187. Zhu L, Zhang T F, Yin L Y, et al, 2013. Numerical modeling analysis on mesoscale features and forming reason of an extra torrential rain event happened on June 25, 2010 in Yunnan Province [J]. J Yunnan Univ (Nat Sci), 35(S1): 172-182, 187 (in Chinese).
- Fu S M, Wang H J, Sun J H, et al, 2016. Energy budgets on the interactions between the mean and eddy flows during a persistent heavy rainfall event over the Yangtze River Valley in summer 2010 [J]. J Meteor Res, 30(4): 513-527.
- Li D S, Sun J H, Fu S M, et al, 2016. Spatiotemporal characteristics of hourly precipitation over central eastern China during the warm season of 1982-2012 [J]. Int J Climatol, 36(8): 3148-3160.