罗菊英,张家国,许冠宇,等.2020年夏季鄂西南一次极端暴雨过程成因分析[J].沙漠与绿洲气象,2023,17(2):26-35. doi:10.12057/j.issn.1002-0799.2023.02.004

开放科学(资源服务)标识码(OSID)



# 2020年夏季鄂西南一次极端暴雨 过程成因分析

罗菊英<sup>1</sup>,张家国<sup>2</sup>,许冠宇<sup>2</sup>,黄小彦<sup>2</sup>,章翠红<sup>2</sup> (1.恩施自治州气象局,湖北 恩施 445000;2.武汉中心气象台,湖北 武汉 430074)

摘 要:2020年7月26日鄂西南出现了一次极端暴雨过程,建始县城区及附近乡镇在10h 内雨量超过 250 mm,导致罕见山洪灾害。利用常规资料,结合地面加密自动站、多普勒天气雷达 以及高分辨率 EC 再分析资料,分析该过程天气形势背景、中尺度环境,以及暴雨中尺度对流系统 发生发展过程及其机理,揭示极端暴雨成因。结果表明:(1)中高纬度维持两槽一脊,低纬度副热 带高压稳定且位置适中,是鄂西南强降水较长时间维持的有利条件:(2)冷空气侵入四川盆地导 致西南涡发展,涡前西南暖湿气流加强,加上鄂西南地形辐合抬升作用,形成深厚正涡度柱和强 烈垂直上升运动,是导致极端暴雨产生的重要原因;(3)建始县附近先后经历了后向传播型 (BB-QS)及涡旋型(VS)两个中尺度对流系统的影响,而"倒喇叭口"地形导致雷暴冷池逆流并与 环境风形成稳定的中尺度辐合上升运动,是极端暴雨中尺度对流系统形成的关键因素。

关键词:极端暴雨;中尺度系统;地形 中图分类号:P458.121.1 文献标识码:A

文章编号:1002-0799(2023)02-0026-10

恩施自治州位于鄂西南,全境为山地,海拔 300~3 000 m,东、北、西三面环山,中、南部为海拔 较低的谷地,地形地貌总体呈倒"V"型喇叭状<sup>II</sup>, 喇叭口地形具有抬升和收缩作用,易造成极端强降 水灾害。复杂地形地貌影响下,汛期鄂西南极端暴雨 频发,强降水直接导致或间接诱发的山洪、城市内涝 等次生灾害对当地人民生命财产和国民经济危害重 大。2020年汛期,位于鄂西南的恩施自治州出现了 多次极端暴雨过程,其中以7月26日出现的强降雨 天气过程尤为极端,全州大范围暴雨或大暴雨,建始 县城区及其附近乡镇特大暴雨形成严重山洪和城市 内涝,导致较严重人员伤亡。针对这次建始县出现的 区域性特大暴雨过程,各家数值预报误差大,比实况

收稿日期:2021-11-12;修回日期:2022-02-18

偏小2个量级以上,以7月25日08时模式起始场 为例,针对 25 日 20 时—26 日 20 时 24 h 累积量, EC、GRAPES、NCEP 三家模式预报分别为大雨、中 雨、暴雨,各级台站预报均不太理想。究其主要原因: 一是数值预报对复杂山地地形影响下的强降水预报 能力相对平原地区明显偏弱,特别是山区局地极端 强降雨,数值预报误差更大;二是对鄂西南山地暴雨 机理研究总结较少,对复杂地形地貌背景下极端暴 雨的形成机理认识不足。

地形对暴雨的作用尤其是局地极端暴雨的形成 十分重要。近年来,多位学者研究表明,中尺度地形 在边界层中尺度天气系统形成、中尺度对流系统结 构演变中起到重要作用[2-6]。地形的动力作用易触发 大暴雨[7],山脉的阻挡、中尺度地形绕流对暴雨过 程中的中尺度对流系统形成和维持有明显影响, 尤其是喇叭口地形对强降雨的强度和落区有较大 影响[8-10]。研究表明长江中游梅雨期大别山西侧雷暴 冷池逆流的形成、夜间超低空低空急流的加强与极

基金项目:中国气象局预报员专项(CMAYBY2020-083);湖北省气 象局重点项目(2021Z01)

作者简介:罗菊英(1972—),女,正高级工程师,主要从事暴雨及极端 天气预报分析研究工作。E-mail:396606423@qq.com

端暴雨发生有密切关系<sup>[11]</sup>,鄂西山地一平原过渡带 是中尺度涡旋及中尺度对流系统多发地四。另外,还 有众多学者通过数值模拟等方法针对地形对极端暴 雨形成的作用进行了分析[13-19]。上述研究为山区极 端暴雨预报提供了一些有意义的参考,但由于极端 暴雨发生极具地域性,预报难度大,针对鄂西南复杂 地形影响下的极端暴雨成因,目前可供业务应用参 考的相关研究成果较少,因此,迫切需要开展针对鄂 西南山区极端暴雨天气成因的研究。下面利用常规 资料,地面加密雨量站、多普勒雷达以及 EC 再分析 资料(空间分辨率为0.25°×0.25°,时间分辨率为1h), 采用实况分析、天气学诊断分析等方法,结合山地地 形特征,围绕极端暴雨形成的天气形势背景、主要影 响系统发生发展机理及中尺度对流系统特征、演变 机制等,对 2020 年 7 月 26 日鄂西南暴雨特别是建 始县特大暴雨形成原因进行综合分析, 以期为鄂西 南山区汛期极端暴雨预报预警提供参考依据。

#### 1 降水实况与灾情

2020年7月25日20时—26日20时(北京时, 下同),四川东部、重庆大部、湖北西南部出现大范围 暴雨,湖北省内其它大部地区以中等强度降水为主 (图 1a)。位于鄂西南的恩施州出现了大范围暴雨、 局部大暴雨或特大暴雨,全州360个加密雨量站日 雨量统计显示,暴雨147站,大暴雨42站,特大暴雨 7站。其中恩施州北部的建始城区及以北乡镇为此 次暴雨过程最强中心(图 1b),有6站达特大暴雨量 级,最大为建始县头坝堰,达359 mm,建始本站出现 262.2 mm特大暴雨,为1959年建站以来极大值。

恩施州强降水发生于 26 日 02—20 时,建始强 降水集中在 26 日 02—10 时。360 个加密站中,有 167 站逐小时雨强达到短时强降雨(≥20 mm·h<sup>-1</sup>), 小时雨强最大为 91 mm,出现在 26 日 03 时的建始 茅田站,建始本站小时雨强最大为 88.5 mm,出现在 26 日 07 时。在最大小时雨强≥50 mm·h<sup>-1</sup> 的22 站 中,有 13 站位于建始县,其中雨强≥80 mm·h<sup>-1</sup> 的 3 个站均位于建始县。下面选取此次降水过程中累积 最大和次大的头坝堰、刺竹坪站,小时雨强最大和次 大的茅田、建始国家站做逐小时降水变化(图 2)可 以看出,此次特大暴雨过程具有突发性强、强降水时 段相对集中、强降水持续较长、致灾风险很高等特点。

从单站雨强≥50 mm·h<sup>-1</sup>出现的频次看,在26 日04—08时,极端暴雨区域自北向南先后有3站持续2h及以上,其中头坝堰站26日04—06时连续



图 1 2020 年 7 月 25 日 20 时—26 日 20 时长江 流域(a)和恩施州(b)累积雨量空间分布 (单位:mm,黑色实心圆为建始站)

3h雨强>50mm(图2)。建始城区及附近乡镇高度 集中的短时极端暴雨,导致附近多条中小河流域 水位陡涨,县城出现严重内涝。造成直接经济损失 48091万元,建始县城溺亡6人、失踪1人。

# 2 极端暴雨成因

2.1 有利的环流背景





基本稳定,为"两槽一脊"型,贝加尔湖西为宽广低 槽,不断有冷空气分裂南下,贝加尔湖南的冷槽后部 一支较强盛的西北气流直达长江流域至华南地区; 30°N附近,川东有短波槽东移发展,恩施州正处于 西北与西南气流汇合区中。200 hPa分流区正好位 于川东到湖北西南部。同时,中低层成都到重庆为低 涡中心,恩施州处于 700 hPa 冷湿切变南侧、850、 925 hPa 暖湿切变辐合区附近。在低纬,副热带高压 西伸北抬呈东西带状,588 dagpm 脊线位于 25°N 附 近。综合上述,短波槽的东移、西南低涡的发展导致 涡前西南暖湿气流的加强,副热带高压的稳定有利 于鄂西南强降雨的发生和维持。



图 3 2020 年 7 月 25 日 20 时天气系统综合配置 (黑色实心圆为建始站,保留线条为 500 hPa 等高线)

25日20时,长江中下游南部有江淮静止锋活动,受副热带高压西侧南风气流影响,川南到我国西南大部暖低压倒槽发展,鄂西南处于地面暖低压东段顶部附近,对应高空图上,暖低压从地面伸展到了

925 hPa 附近,暖低压发展导致大气层结不稳定增强,25日20时的恩施站探空湿有效位能也表现出高能特点。26日02—10时,地面冷锋侵入地面暖倒槽,该时段中尺度对流系统活跃,环境条件极有利于强对流暴雨天气发生。

#### 2.2 中尺度低涡切变强辐合

采用 EC 再分析资料,选取强降雨集中时段的 26 日02—12 时进行小时系统演变分析,同时选取极 端暴雨过程中小时雨量极大值和次大值发生临近时 次的7 月 26 日 02、06 时进行中尺度综合分析(图 4)。

分析逐小时流场,26 日 02—05 时,850 hPa 西 南涡稳定在重庆西南与四川交界,05 时后,低涡沿 着 700 hPa 切变线向东北偏东方向移动到重庆中 部,特大暴雨区处于低涡移向的右前方。7 月 25 日 22 时后暖湿气流加强,26 日 01—07 时恩施州南部 850 hPa 出现 12 m/s 以上的低空急流,在强雨区附 近出现西南风与偏东风的强辐合区。同时,700 hPa 切变后部从7月 25 日 20 时开始出现 12 m/s 以上 的东北气流,03 时后明显加强,06—10 时持续 24 m/s 的大风速轴,这支强东北气流在 26 日白天 维持并随着降水系统逐渐南压,13 时后减弱至 20 m/s 以下。

分析 26 日 02、06 时中尺度系统综合图(图 4), 均具有 700 hPa 强东北气流,850 hPa 强西南气流与 偏东气流强辐合特征,但 06 时动力辐合特征表现更 明显,700、850、925 hPa 低涡中心与地面中尺度气 旋重叠在重庆中部,恩施州位于 700 hPa "人"字形 切变附近、冷变尾部,形成深对流垂直结构下深厚正 涡度柱和强烈的垂直上升运动,从而引发强对流暴 雨<sup>(20)</sup>。



(黑色圆圈内红色阴影区为特大暴雨落区)

综上,700 hPa 强偏北气流带动槽后冷空气入 侵地面暖倒槽,深厚稳定的低涡切变中尺度对流系 统,是造成此次极端强降雨最直接的影响系统。

为了进一步证明中尺度低涡切变对流系统动 力、水汽等特征,利用 EC 再分析资料沿建始站 (109.7°E、30.6°N,海拔 601 m)做7月 25-26 日垂 直运动时间剖面(叠加散度和水平风场,图5a),沿 30.6°N 做 7 月 26 日 08 时水汽通量空间剖面(图5b)。 由图 5a 可知,26 日 02-08 时,建始上空出现强上升 运动,03-07时为最强时段,其中06时前后出现垂直 速度为-1.2 Pa·s<sup>-1</sup>、散度为-9×10<sup>-5</sup> g·cm<sup>-2</sup>·hPa<sup>-1</sup>·s<sup>-1</sup> 极大值,辐合中心伸展到 200 hPa 附近,且强垂直上 升运动区几乎垂直,南北跨度小,具有深厚湿对流特 征,对流区 200 hPa 以上以辐散为主。由图 5b 可知, 26日08时,在建始上空为强西南与偏北气流汇合 区,水汽通量>10 g·(s·cm·hPa)<sup>-1</sup>的大值区位于 850~600 hPa,也相对深厚。饱和气柱与深厚垂直上 升运动区形成耦合结构,极有利于激发强对流[21-23], 与上述一致。

2.3 地面中尺度低压强烈发展

分析地面天气实况图(图 6),25 日白天,随着高 空槽和中低层低涡切变发展,暖低压也由 25 日 08 时的东西带状变成东北—西南带状(图 6a)。25 日 23 时—26 日 08 时,弱冷空气由盆地北部入侵到低 压槽内,暖低压在重庆、鄂西南一带开始出现多个中 尺度低压,低压附近或北侧出现较明显降雨。建始南 到恩施北部—直维持—个中心值小于 1 000 hPa 的 中尺度低压中心,26 日 02—08 时中尺度低压达到 最强(图 6b、6c),极端暴雨出现在低压北侧。12 时 后,造成建始极端暴雨的中尺度低压中心消失,降雨 明显减弱南压(图 6d)。

结合逐小时区域站地面实况图,建始南部低压 中心站点神堂(109.821°E,30.358°N)25日20 时—26日10时气压值<998hPa,26日04时达到 极小值,为993.9hPa(表1)。建始城区附近6个特 大暴雨站雨量监测表明,中尺度低压的发生发展 与短时强降雨密切相关。强降水集中时段为26日 03—11时,强降水随着系统演变自北向南发展, >50 mm/h的短时强降雨均发生在中心气压值 ≤996hPa的地方,26日03时建始茅田的小时雨 量极值为90.3 mm/h,对应附近时次气压在994hPa 左右,正好处于低压中心极小值附近。

2.4 极端且有利的中尺度环境条件



7月26日的建始特大暴雨,主要由中尺度对流

图 5 沿 109.7°E、30.6°N 垂直运动时间剖面(a,单位:Pa·s<sup>-1</sup>)及沿 30.6°N 水汽 通量空间剖面 (b,单位:g·(s·cm·hPa)<sup>-1</sup>)

(a为2020年7月25日20时—26日20时,紫色线为散度;b为2020年7月26日08时)

表	. 1	ء 2020	手7	月	26	日	02 -	-12	时	中	尺)	度低	远	中	心值	1与	特	大	暴	雨站	点	小	、时	雨·	量双	计と	ť
---	-----	--------	----	---	----	---	------	-----	---	---	----	----	---	---	----	----	---	---	---	----	---	---	----	----	----	----	---

		02时	03时	04 时	05 时	06时	07 时	08时	09时	10 时	11 时	12 时
中心气压/hPa		994.7	994.6	993.9	994	994.4	995.1	995.8	996.2	996.9	998	998
	茅田	13.2	90.3	37.2	17.5	10.1	4.4	2.7	2.7	12.4	25.8	8.7
小叶	刺竹坪	7.9	16.7	61.3	55.3	38.5	12.2	1.6	4.4	21.3	24.9	6
小吗 雨量	红瓦屋	0.1	0.1	25.3	10.6	41.5	47.9	22.4	3.4	21.3	13.2	3
/mm	头坝堰	3.3	12.9	52.4	68.2	53.3	42.3	31.7	17.8	41.1	17.3	5.2
	建始				14.8	28.3	88.5	43	25.3	30.3	21.6	3.9

注:阴影加深为小时雨强>20 mm/h,其中字体加粗为≥50 mm/h;表中站点根据所处地理位置从北到南自上而下排列。

系统降水导致,极端暴雨对流发生发展过程中,由于 强烈的上升气流抽吸作用强迫了环境暖湿气流进一 步加强,造成了环境大气对流有效位能的显著增加, 因而 CAPE 的大小与对流发展高度具有较好的对应 关系[24]。统计 2005—2020 年建始城区 18 次大暴雨 及以上强降水过程,分析强降水临近时恩施探空实 况表征层结稳定和动力抬升、能量的常用参数 K(K 指数)、CAPE(湿对流有效位能)、W CAPE(最大上升速 度)及相关特征高度值可见(表 2),2020年7月26 日特大暴雨临近发生的 25 日 20 时, CAPE、K 指数、 W CAPE分别达到了 3 337.4 J/kg、41 ℃、81.7 m/s,说明 大气中蓄积了大量不稳定能量,大气层结极不稳定, 具有强上升运动等强对流天气特征。与2005年以来 多个大暴雨实例对比表明,2020年7月26日特大 暴雨的 CAPE、W CAPE 位居第一,具有极端性。0℃ 和-20 ℃层高度均排历史第三位,0 ℃层达5921 m, -20 ℃层(对流云顶)达9087 m,暖云层深厚,对流发 展旺盛,有利于高降水率形成。

利用 EC 高分辨率再分析资料做 7 月 25 日 20 时—26 日 20 时沿建始(109.7°E、30.6°N)的水汽通 量剖面,同时选取建始城区降水最强时段 26 日 06—07 时恩施雷达风廓线进行分析(图 7)。26 日 02—10 时为水汽通量大值集中时段(图 7a),建始 800 hPa 附近水汽通量超过 10 g·(s·cm·hPa)<sup>-1</sup>。 06—07 时(图 7b),西南风伸展到 7.3 km 附近,比 25 日 20 时恩施探空 0 ℃层高度高 1 km 左右,进一 步证明了暖云层深厚。

表 2 建始大暴雨发生过程中常用对流 参数和特征高度值

序号	日期	雨量 /mm	$\begin{array}{c} \textit{CAPE} \\ \textit{/}(J \boldsymbol{\cdot} Kg^{-1}) \end{array}$	<i>K</i> /℃	$W_{\_CAPE}$ /(m·s <sup>-1</sup> )	<i>ZH</i> /m	<i>H</i> <sub>-20</sub> /m
1	2005-07-10	146.4	794.4	42	39.9	5 446	8 962
2	2008-07-04	195.9	1 236.9	40	49.7	5 427	8 866
3	2008-07-22	106.5	1 656.1	41	57.6	5 427	8 893
4	2009-06-29	106.9	1 315.8	40	51.3	5 290	8 692
5	2010-08-15	143.5	854.2	42	41.3	5 489	9 430
6	2011-07-07	167.1	2 839.3	38	75.4	6 016	9 305
7	2012-09-12	111	74.5	35	12.2	5 072	8 414
8	2014-09-02	118	1 643.8	39	57.3	5 070	8 736
9	2015-06-30	111.2	3 014.9	42	77.7	6 056	9 352
10	2016-06-01	156.4	708.3	40	37.6	5 860	8 751
11	2016-06-24	146	2 365.8	42	68.8	5 685	9 053
12	2016-07-19	218.7	1 113.1	42	47.2	5 473	9 030
13	2016-08-05	148.4	2 027.7	43	63.7	5 074	8 756
14	2016-09-27	136.4	1 673.3	37	57.8	5 662	8 632
15	2017-07-08	116.2	912	40	42.7	5 512	9 008
16	2018-05-06	103.7	180.6	32	19	4 013	7 279
17	2020-07-17	104.2	230.7	39	21.5	5 560	9 166
18	2020-07-26	262.2	3 337.4	41	81.7	5 921	9 087
	均值		1 443	40	50	5 447	8 856
	最大		3 337	43	82	6 056	9 430
	最小		75	32	12	4 013	7 279
	距平		1 894	1	32	474	231
	排位		1	3	1	3	3

注: 距平和均值均指 2020 年 7 月 26 日特大暴雨与历 史个例对比。



为进一步表征水汽与动力对极端暴雨的综合影响,用 EC 再分析资料沿 30.6°N 做 26 日 02 和 08 时的水汽通量散度(叠加水平风场)空间剖面(图 8)。 由图 8 可知,在建始极端暴雨最强降水时段的02—08 时上空,存在低层辐合、高层辐散的水汽垂直输送条件。26 日 02 时,水汽通量散度为  $-1.5 \times 10^{-7}$ g·cm<sup>-2</sup>·hPa<sup>-1</sup>·s<sup>-1</sup>的大值中心位于 800 hPa 附近(图 8a),26 日 08 时强水汽辐合中心下降到近地层(图 8b),结合 26 日 08 时恩施探空实况, *CAPE*、*K* 指数、*W*\_CAPE分别为 1 231.7 J/kg、38 °C、49.6 m/s,可以推算在极端暴雨发生过程最强时段的 26 日 02—08 时,中等强度有效位能一直持续,极有利于高降水率的形成<sup>[25]</sup>。

## 2.5 山区复杂地形作用

鄂西南山地暴雨时空分布具有明显的地方性特点,恩施州暴雨气候背景分析<sup>[26]</sup>,在山谷纵深处的地 形辐合区,山脉迎风坡地,或同时具有"喇叭口"地形 辐合与迎风坡抬升条件的区域,是常年暴雨或大暴 雨多发中心。地形对暴雨的影响主要表现在动力和 热力两个方面,动力作用主要表现在地形的强迫抬 升引起的垂直运动加强,还表现在地形使系统性风 向发生改变,产生地形辐合后上升运动加强和雨量 的增大<sup>[27]</sup>。

此次特大暴雨,均发生在东、北、西部三面环山, 南部开口的谷地和山坡,特大暴雨落区附近地形地 势主要为"倒喇叭口"形状,特大暴雨站点与周边山 脉海拔高差在400~1500 m,坡度较大,在部分海拔 较高的特大暴雨站点,如红瓦屋(海拔1570 m)、刺 竹坪(海拔1475 m)同时处于迎风坡半山腰。下面 主要结合 EC 再分析流场资料,针对地形的作用对7 月26 日特大暴雨影响及强对流触发进行简要分析。

850 hPa 风场显示(图 9),26 日 02 时后,随着 高空槽东移后西南涡发展,建始南部处于涡前明显 西南气流中,山谷口风速达到低空急流强度,北部偏 北气流在经过鄂西南山地时沿着山谷形成绕流,由 西北风转为偏东气流,南北两支气流同时向处于山 谷"倒喇叭口"的极端暴雨区灌进汇合,同时,在地形 的收缩作用下,建始附近出现西南风与东南风的强 辐合,上升运动加强。由图 9 还可以看出,建始南部 盛行的西南气流从南向北越接近山谷深处风速越



图 7 7月25日20时—26日20时沿109.7°E、30.6°N的水汽通量时间剖面(a,单位:g·(s·cm·hPa)-1)和 7月26日06:17—07:17 雷达风廓线(b,单位:m/s)



图 8 沿 30.6°N 水汽通量散度空间剖面 (a 为 26 日 02 时,b 为 26 日 08 时;单位:10<sup>-8</sup> g·cm<sup>-2</sup>·hPa<sup>-1</sup>·s<sup>-1</sup>)

小,地形喇叭入口处风速普遍为 10~12 m/s,山谷纵 深处的建始城区附近及周边山脉风速减弱,为 2 m/s。 这说明在极端暴雨区附近,不仅存在偏北(东)与偏 南气流的风向辐合,同时,西南暖湿气流向"倒喇叭 口"灌进时,由于山脉的阻挡和摩擦也形成了明显风 速辐合,产生了水汽通量的净辐合,为极端暴雨产生 提供了充足的水汽来源。



图 9 建始附近高精度地形与 7 月 26 日 06 时 EC 再分析场 850 hPa 流场叠加 (白色为风矢量场,绿色阴影区为 12 及以上等风速区, 单位:m/s;红色箭头线为气流方向;红色点断线为 中尺度辐合线,蓝色实心圆为建始站点)

恩施雷达站位于建始西南部,从雷达基本速度 图(图 10)可知,在极端暴雨最强时段的 26 日 0208时,建始周边受西南气流控制,为正速度区(暖色 区),而其西南部西南暖湿气流不断加强,达到12 m/s 以上低空急流强度。同时其北部出现了小范围的中 尺度来向气流(冷色区)。同时分析雷达反射率因子 发现,该区域有对流性强降水回波,显然,它是向南 的雷暴冷出流反映。张家国等凹研究大别山对雷暴 冷池影响时指出, 雷暴冷池受大别山地形阻挡会形 成逆流,而冷池逆流与环境低空急流之间形成强烈 辐合,导致雷暴在上风方新生,形成后向传播的 MCS,如果两者形成对峙,MCS少动,极易产生持续 性强降水。结合地形特点,推断这次过程在建始附近 形成准静止后向传播中尺度对流系统可能原因是: 建始北部合并加强的强对流系统产生的雷暴冷池在 周围地形作用下主要向南喇叭口区域流出,该中尺 度冷出流与环境低空西南急流形成了强烈的稳定少 动辐合上升运动,导致单体在上风方新生、老单体在 下风方消亡的 BB 模态 MCS 形成,这可能是建始县 局部出现极端暴雨的重要原因。

# 3 中尺度对流系统结构与演变特征

图 11 是 7 月 25—26 日恩施雷达组合反射率 因子演变图。分析可见,在此次极端暴雨发生发展过 程中,强降水中尺度对流回波演变存在合并加强、准 静止—向后传播与涡旋发展东移 3 个阶段,建始特 大暴雨主要发生在中尺度对流系统准静止——后向传



图 10 7月26日03:05(a、b)、05:58(c、d)不同仰角雷达基本速度 (黑色圆圈为建始站)

播阶段。历史统计表明,造成鄂西南暴雨的雷达反射 率因子最大强度为 40~50 dBZ,而此次极端暴雨发 生过程中,60 dBZ 左右强回波维持了近 10 h,对流 高度 7~9 km,是一次深对流主导的极端暴雨事件。

3.1 MCS 合并加强阶段

MCS 合并加强阶段主要出现在 25 日 23 时—7 月 26 日 02 时(图 11a~11c),此时正值西南涡前西 南急流的发展加强时期。25 日 20 时左右开始,在建 始北、西北和东北有 60 dBZ 的强对流单体;23 时左 右(图 11a),建始北部出现分散性对流单体,其中 A、B、C 最为显著,强度为 55 dBZ 左右。之后,A 少 动,C 逐渐减弱,B 向偏西方向移动,发展明显(图 11b),同时建始站西北侧不断有新单体生成,26 日 02 时左右,B、C 合并加强为西南—东北走向线状密 实的对流系统 D(图 11c、11d),系统 D 缓慢向西南 方向伸展,建始正位于其前方,强烈降水开始出现。 **3.2** MCS 准静止—向后传播阶段

极端暴雨事件与强烈发展的对流中尺度系统有 关[28]。国外研究表明,雷达上产生极端暴雨的中尺度 对流系统有尾随层状云、前导层状云、平行层状云、 准静止--后向传播和邻接层状云等5种主要线状模 态,长江中游梅雨期极端暴雨中尺度对流系统除这 几种模态外还有镶嵌型和涡旋型两种重要模态[29]。 建始暴雨是由先后出现的准静止—向后传播 MCS 和涡旋型 MCS 两种中尺度对流系统模态产生的。7 月 26 日 02—08 时为 MCS 准静止—向后传播阶段。 26 日 02 时以后,中尺度对流系统 D 西南方有新的 对流单体不断生成,强回波带主体长轴呈西南一东 北状。从图 11c 可以看到,中尺度对流系统 D 西南 方有一新的对流单体 E 生成,系统 D 向西南移动两 者逐步合并。从回波组织结构看,此时,中尺度对流 系统 D 南部(上风方)为新生对流单体区,北部(上 风方)对流消亡为层状云区,整体上已经构成了准静 止一向后传播 MCS 模态特征,此后强回波带主体长 轴维持西南-东北状,04-08时(图 11d~11h),在 中尺度对流系统 D 前又有 F、G 向后生成并融入到 D中,使得 D 沿长轴向西南方向不断发展并缓慢延 伸,并维持了约6h。期间,建始一直处于该中尺度 对流系统强回波影响之下,60 dBZ 左右强回波在建 始城区附近及北部乡镇持续,50 mm·h<sup>-1</sup> 短时强降 雨均出现在这一时段内,为极端暴雨最强最集中时 段。从最强降水中心移动路径看,也由东北向西南缓 慢移动,02-05时,强降雨稳定维持在建始城区北部 乡镇,02-03时位于建始北部的茅田乡出现本轮极 端强降雨中小时雨量极大值(90.3 mm·h<sup>-1</sup>),05 时以后,强回波略有南压,07:18,出现此次极端强降雨回波极大值(66 dBZ),06—07 时,建始城区出现本轮极端强降雨中小时雨量次大值(88.5 mm·h<sup>-1</sup>)。

MCS 出现准静止后向传播状态,主要原因是中低层西南急流在夜间明显加强,同时建始附近雷暴冷出流主要沿建始、恩施峡谷平原地带南下并与西南急流汇合形成对峙有关<sup>[30]</sup>,与上述地形对强降水影响分析吻合。

3.3 MCS 涡旋发展东移阶段

7月26日08—10时为MCS涡旋发展阶段,具 有涡旋型MCS模态结构特征。08时左右,随着西南 涡缓慢东移,涡前有一个中尺度对流系统向东北移 动,与南下的中尺度对流系统D在建始南部结合, 两者合并再度加强并形成具有涡旋状回波的中尺度



图 11 2020 年 7 月 25—26 日恩施雷达组合反射率 因子强降水中尺度对流系统演变 (黑色圆圈标注为建始站,黑色实线为强回波带主体长轴方 向;虚线框内为极端暴雨中尺度对流系统单体或主要区域)

对流系统 H(图 11i)。系统 H 先后经历向北、再转向 东移动的过程,08—10 时给建始南部、恩施北部带 来 100 mm 左右强降水,但与 02—08 时相比,雨强 明显减弱,强度一般在 20~40 mm·h<sup>-1</sup>。此阶段,强回 波带长轴由东北—西南向转为南北向为主,对流回 波逐渐减弱,11 时左右(图 11j),基本为大范围层状 云回波,影响建始的 MCS 生命史结束,强降水结束。

### 4 结论与讨论

通过对 2020 年 7 月 26 日发生在鄂西南建始县 城区及附近乡镇一次区域性特大暴雨的成因分析, 得到如下结论:

(1)中高纬度维持两槽一脊、低纬度副热带高 压稳定且位置适中是此次极端强降水较长时间维持 的有利大环流背景条件。

(2)冷空气侵入四川盆地导致西南涡发展和暖湿气流加强,加上鄂西南地形辐合抬升作用,形成深厚正涡度柱和强烈垂直上升运动(深对流),是导致极端暴雨产生的重要原因。

(3)在极端暴雨发生过程中,中尺度环境条件表 现出高能、强上升运动、高降水率等极端性特征,对 激发强对流暴雨及强降水维持起到了重要作用。

(4)雷达实况监测在建始附近先后经历了后向 传播型(BB-QS)及涡旋型(VS)两个极端暴雨中尺 度对流系统影响,而"倒喇叭口"地形导致雷暴冷池 逆流并与环境风之间形成稳定的中尺度辐合上升运 动,MCS 出现准静止后向传播,是导致极端暴雨形 成的关键因素。

本文的研究结果,对鄂西南山区夏季极端暴雨 形成机理有一定的认知,但由于观测资料限制,地形 的热力作用等未能探讨。针对山区极端暴雨预报难 的现状,在未来工作中,暴雨预报在参考全球数值模 式基础上,需要加强高分辨率区域模式的应用,同 时,还需要结合本地地形地貌,对不同类型、不同区 域极端暴雨成因进行进一步分析研究,建立适用的 强降水预报思路或极端暴雨天气学概念模型。

#### 参考文献:

- [1] 张全榜.恩施州志 1983—2003[M].武汉:湖北人民出版 社,2013:11.
- [2] 廖移山,冯新,石燕,等.2008年"7·22" 襄樊特大暴雨的 天气学机理分析及地形的影响[J].气象学报,2011.69(6): 945-955.
- [3] 张家国,岳阳,王珊珊,等.2008年"7·1"鄂东北特大暴雨 过程的中尺度分析[J].暴雨灾害,2008,31(4):306-312.

- [4] 陈双,王迎春,张文龙.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,2016,35(2):148-157.
- [5] 章翠红,夏茹娣,王咏青.地形、冷池出流和暖湿空气相互作用造成北京一次局地强降水的观测分析[J].大气科学学报,2018,41(2):207-219.
- [6] 王珏,张家国,吴涛,等.湖北省极端短时强降水 MCS 类 型及特征分析[J].气象,2019,45(7):931-944.
- [7] 盛春岩,高守亭,史玉光.地形对门头沟一次大暴雨动力 作用的数值研究[J].气象学报,2012,70(1):65-77.
- [8] 赵玉春,许小峰,崔春光.中尺度地形对梅雨锋暴雨影响 的个例研究[J].高原气象,2012,31(5):1268-1282.
- [9] 杨侃,纪晓玲,毛璐,等.异常环流背景下贺兰山地形对 8·21 特大致洪暴雨的影响分析[J].自然灾害学报,2020, 29(1):132-142.
- [10] 陈豫英,陈楠,任小芳,等.贺兰山东麓罕见特大暴雨的 预报偏差和可预报性分析[J].气象,2018,44(1):159-169.
- [11] 张家国,周金莲,谌伟,等.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,2015,73(2): 291-304.
- [12] 吴涛,张家国,牛奔.一次强降水过程涡旋状 MCS 结构 特征及成因初步分析[J].气象,2017,43(5):540-551.
- [13] 胡伯威,崔春光,房春花.1998 年 7 月 21-22 日鄂东沿 江连日特大暴雨成因探讨[J].大气科学,2001,(4):479-491.
- [14] 赵玉春,崔春光.2010年8月8日舟曲特大泥石流暴雨 天气过程成因分析[J].暴雨灾害,2010,29(3):289-295.
- [15] 王宁,张立凤,彭军,等.局部地形对北京"7·21"特大暴 雨影响的数值研究[J].暴雨灾害,2014,33(1):10-18.
- [16] 陈春艳,孔期,李如琦.天山北坡一次特大暴雨过程诊断 分析[J].气象,2012,38(1):72-80.
- [17] 池再香,邱斌,康学良,等.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,2011,34
  (6):708-716.
- [18] 董春卿, 苗爱梅, 郭媛媛, 等. 地形对山西垣曲"0729"特 大暴雨影响的数值模拟分析[J]. 干旱气象, 2015, 33(3): 452-457+467.
- [19] 高珩洲,李国平.黔东南地形影响局地突发性暴雨的中
  尺度天气分析与数值试验[J].高原气象,2020,39(2):
  301-310.
- [20] 肖递祥,杨康权,俞小鼎,等.四川盆地极端暴雨过程基本特征分析[J].气象,2017,43(10):1165-1175.
- [21] 陈红专,叶成志,唐明晖.2011年6月湖南两次暴雨过 程的中尺度特征对比分析[J].气象,2013,39(12):1580-1590.
- [22] 张萍萍,董良鹏,钟敏.等.湖北省西南气流型暖区暴雨 相关特征分析[J].沙漠与绿洲气象,2019,13(6):13-19.

- [23] 赵娴婷,王晓芳,王珏,等.2016年7月18—20日湖北 省特大暴雨过程的中尺度特征分析[J].气象,2020,46 (4):490-502.
- [24] 孙继松,雷蕾,于波,等.近 10 年北京地区极端暴雨事件的基本特征[J].气象学报.2015,73(4):609-623.
- [25] 俞小鼎.强对流天气临近预报[M].北京:中国气象局培 训中心,2012:81-82.
- [26] 罗菊英.近 45 年恩施自治州暴雨气候特征分析[C]//湖 北省气象学会.湖北省气象学会学术年会学术论文详细 文摘汇集.武汉:湖北省科学技术协会,2005.
- [27] 朱乾根,林锦瑞,寿绍文,等.天气学原理与方法[M].4 版.北京:气象出版社,2007:331-347.
- [28] 孙建华,赵思雄,傅慎明,等.2012 年 7 月 21 日北京特 大暴雨的多尺度特征[J].大气科学,2013,37(3):705-718.
- [29] 张家国,王珏,吴涛,等.长江中游地区极端降水主要天 气系统类型分析[J].暴雨灾害,2018,37(1):14-23.
- [30] 蔡雄辉,邱学兴,郭婷,等.安徽北部一次局地特大暴雨 过程的中尺度特征分析[J].沙漠与绿洲气象,2021,15 (4):83-91.

# Causes of an Extreme Rainstorm in Southwestern Hubei in the Summer of 2020

LUO Juying<sup>1</sup>, ZHANG Jiaguo<sup>2</sup>, XU Guanyu<sup>2</sup>, HUANG Xiaoyan<sup>2</sup>, ZHANG Cuihong<sup>2</sup> (1.Enshi Region Meteorological Bureau, Enshi 445000, China; 2.Wuhan Central Meteorological Observatory, Wuhan 430074, China)

**Abstract** There was an extreme rainstorm in southwestern Hubei on July 26,2020, and the rainfall in Jianshi county and its nearby towns exceeded 250 mm within 10 hours, resulting in rare flash floods. Based on the conventional data, combined with the ground encryption automatic station, Doppler weather radar and high-resolution EC reanalysis data, this paper analyzes the weather background, mesoscale environment, the occurrence and development process of the mesoscale convective system and its mechanism, and reveals the causes of extreme rainstorm. The results show that: (1) Two troughs and one ridge are maintained at medium and high latitudes, and the low-latitude subtropical high is stable and moderate, which are favorable conditions for the long-term maintenance of heavy precipitation in western and southern Hubei; (2) Cold air invading into the Sichuan basin leads to the development of the southwest vortex, the warm and humid air flowing is strengthened in the southwest in front of the vortex, combing with the uplift of irradiation in southern Hubei, forming a deep positive vorticity column and a strong vertical upward motion, which is an important cause of extremely heavy rain; (3) The influence of backward medium-scale convection system (BB-QS) and vortex type (VS) experienced successively. The "inverted horn mouth" terrain leads to a reverse thunderstorm cold pool and a stable mid-scale convergence upward motion with the ambient wind, which is a key factor for the formation of extreme rainstorm meso-scale convective system.

Key words extreme rainstorm; mesoscale; mountainous terrain