

诸玲,袁钰容,刘宇.冷空气背景下湘北地区 2 次预报失误的暴雨个例分析[J].中低纬山地气象,2023,47(3):61-67.

冷空气背景下湘北地区 2 次预报失误的暴雨个例分析

诸 玲¹,袁钰容¹,刘 宇²

(1. 湖南省常德市气象局,湖南 常德 415000;2. 湖南省益阳市赫山区气象局,湖南 益阳 413000)

摘 要:利用常规观测资料、FNL 再分析资料、探空资料等,对 2020 年 6 月 7—9 日(以下简称“6·8”过程)和 7 月 26—29 日(以下简称“7·26”过程)2 次冷空气背景下的暴雨预报失误案例进行对比分析。结果表明:(1)2 次过程环流背景相似,均有冷空气、低涡、切变线配合,且 2 次过程均未形成强西南急流,但由于冷空气强度、影响时间、厚度不同,造成了暴雨的空报和漏报:“6·8”过程偏东风带动弱冷空气缓慢渗透南下,在迎风坡地形作用和暖倒槽向北强烈发展的背景下有利于局地暴雨的发生和维持;“7·26”过程冷空气影响时间过早,强度过强,导致地面辐合线位置偏南,实况雨带偏南;且冷空气阻碍了水汽向北输送,是导致湘北地区暴雨出现空报原因之一。(2)“6·8”过程大气环境场呈现不稳定状态,具备一定的水汽条件和抬升条件,预测灾害出现的位置和发生时间的潜势条件难以从现有观测资料中体现,使得预报难度加大。(3)“7·26”过程冷空气势力过强还表现在中层冷平流较强,存在一支下沉气流,不利于强对流天气的发生发展。在季节环境背景场下,预报员需根据临近冷空气的强度、路径和影响时间进行预报订正。

关键词:冷空气;暴雨;水汽条件

中图分类号:P458.1⁺21.1 **文献标识码:**A

Case Analysis of Two Forecast Errors of Heavy Rain in Northern Hunan under Cold Air Background

ZHU Ling¹, YUAN Yurong¹, LIU Yu²

(1. Changde Meteorological Bureau of Hunan Province, Changde 415000, China;

2. Meteorological Bureau of Heshan District, Yiyang city of Hunan Province, Yiyang 413000, China)

Abstract: Based on the conventional observation data, FNL reanalysis data and radiosonde data, this paper makes a comparative analysis of the rainstorm forecast errors under the cold air background from June 7 to 9 and from July 26 to 29 in 2020. The results show that: (1) the circulation background of the two processes is similar, with cold air, vortex and shear line coordination, and the strong southwest jet did not form in the two processes. However, due to the difference of cold air intensity, influence time and thickness, the empty or missing report of rainstorm was caused: during the process of "6·8" weak cold air was driven by easterly wind to penetrate southward slowly, which was conducive to the occurrence and maintenance of local heavy rain under the background of the topographic action of windward slope and the strong development of warm trough northward. The cold air of "7·26" affected too early and too strong, resulting in the location of the surface convergence line to the south and the real rain belt to the south. In addition, the cold air obstructs water vapor transportation to the north is one of the reasons for the empty forecast of heavy rain in northern Hunan. (2) The atmospheric environment field in the "6·8" process is unstable, and there are certain water vapor conditions and lifting conditions, which are sufficient conditions for the occurrence of disastrous weather. The potential conditions for predicting the location and time of disasters are difficult to be reflected from the existing observation data, making the prediction more difficult.

收稿日期:2022-07-12

第一作者简介:诸玲(1995—),女,工程师,主要从事中短期天气预报工作,E-mail:18408252304@163.com。

(3) The strong cold air force of "7·26" is also manifested in the strong cold advection in the middle layer and the existence of a downdraft, which is not conducive to the occurrence and development of strong convective weather. Under the seasonal environmental background, forecasters need to make forecast corrections according to the intensity, path and influence time of the adjacent cold air.

Key words: cold air; rain storm; the water vapor condition

0 引言

2020 年 6—7 月我国长江中下游地区出现极端梅雨,长江中下游地区累积降水量超过 1998 年同期,为 1961 年以来排名第一^[1]。冷空气南下形成锋面是触发暴雨常见的天气的天气系统之一。陈鹏等^[2]指出,弱冷空气的侵入使得中小尺度对流系统发展旺盛,进而产生强降水天气。干冷空气强度的变化、影响的时间对暴雨分布和强度有着密切联系。一般来说,偏北冷空气由低层侵入与偏南暖湿气流交汇,引起锋生,形成一条向西北倾斜的能量锋区,同时随着冷空气向南逐渐扩散,暖湿空气沿能量锋区向上爬升,触发强烈的垂直上升运动,降水增强^[3]。一些国内外学者通过数值模拟研究干冷空气对暴雨的具体影响。张雪蓉等^[4]也对冷空气强度有研究表明对流层高层干冷空气加强不利于强降水的增强,一定湿度的干冷空气对降水有利。

近年来湖南弱冷空气趋势增多,冷空气、较强冷空气、寒潮的影响频次减小,且冷空气活动与地形因素有很大相关性,弱冷空气在武陵山、雪峰山一带偏多^[5]。冷空气对湘北地区的降水是否起到加强作用?

2020 年 6—7 月 2 次有冷空气配合的暴雨过程,该时段内副热带高压偏强是有利的气候背景,天气尺度和中尺度系统的相互作用使降水区长时间维持强的上升运动,为极端降水提供动力条件,但这 2 次过程一次空报、一次漏报,预报服务效果均不佳。

1 研究资料及预报回顾

本文所用资料为中国气象局下发的各类常规数值预报产品、常规地面和高空观测资料、区域自动气象观测资料以及 FNL 再分析资料($0.5^\circ \times 0.5^\circ$)。其中 EC 为欧洲中期天气预报中心的数值预报产品;GFS 为全球气象预报系统提供的数值预报产品。

1.1 “6·8”过程主、客观预报回顾

7 日 08 时—8 日 08 时,全省暴雨点较为分散,湘北地区强降水主要位于常德南部和益阳,有大一暴雨,局地大暴雨,而预报仅为小雨。8 日湘北北部

局地暴雨、单点大暴雨,预报又出现明显漏报。

预报思路回顾:预报员考虑到全球模式和区域模式对此次降水过程的预报差异,采用 EC 模式形势场预报结论,850 hPa 切变线在湘中,低涡在夜间略有南压的趋势,且西南急流呈东北西南向在湘中以南加强并维持的基础上,加之临近时刻各种物理量产品(包括 CAPE、0~3 km 切变等)均在湘南及湘西南地区有大值区预报降水落区与急流走向一致,因此,判断暴雨以上量级降水主要出现在低空切变线以南及西南急流轴附近。各类全球模式和区域模式强降水中心均位于湘南,进一步影响预报员的判断,决策服务产品主要参考了中央台与省台的预报,因此漏报此次暴雨一大暴雨过程。

1.2 “7·26”过程主、客观预报回顾

26 日湘中以北及怀化南部地区出现了 1 次大一暴雨,局地大暴雨的天气过程,预报较实况明显偏西偏北。27 日预报湘中及以北地区有特大暴雨、大暴雨,而实况仅在湘中地区出现局地的大一暴雨量级降水。

预报思路回顾:26—28 日 EC 临近预报的每个时次起报低涡移动路径调整较大,25 日起预报低涡从湘西进入后移动缓慢,持续 48 h 以上,主要在湖南西部和中北部之间调整且系统深厚叠加高温高湿的不稳定气流,考虑在低涡中心和右前方有暴雨一大暴雨。值得关注的是,27 日降水预报分歧大,中尺度模式较全球模式预报偏南,且 GFS 甚至未报大量级降雨。湖南省气象台 26 日 08 时预报未来 24 h 在湘西州、张家界、常德、怀化、益阳、岳阳有大一暴雨降水,其中张家界全境、桃源、石门、常德市区局地大暴雨。未来 48 h 预报常德中南部、益阳、张家界南部大一暴雨,其中常德市区、桃源、汉寿、安乡、益阳全境局地大暴雨—特大暴雨。最终省台、本地预报员均采信 EC 模式从而造成了空报。

2 天气系统配置对比

2 次过程相似点:高纬度地区均为“一槽一脊”,2 次过程均有弱冷空气配合;中低纬地区,我国中东部受西风槽影响,东北地区稳定维持一高压脊。不同点在于以下 4 个方面。(1)副高位置:“6·8”

过程(漏报)位置偏东偏南,退居海上;“7·26”过程(空报)588线已控制湘南和两广地区。(2)槽底位置和径向度:6月8日受西风带浅槽过境影响,距离较远;7月26日北支槽快速东移,南支槽槽底位置较“6·8”过程偏南,距离较近,槽较深。(3)低涡位置:6月8日随着低层南风加强急流建立,低涡位

于湘中偏北地区;7月26日,高低空系统高度重合,低涡也位于湘西北地区。(4)冷空气路径:6月8日中路偏西路径,7月26日偏西路径。高空槽、中低层切变辐合配合冷空气是一种暴雨常见的天气形势^[6],然而这2次过程一次漏报、一次空报,预报效果均不佳,需深入探析造成预报失败的主要原因。

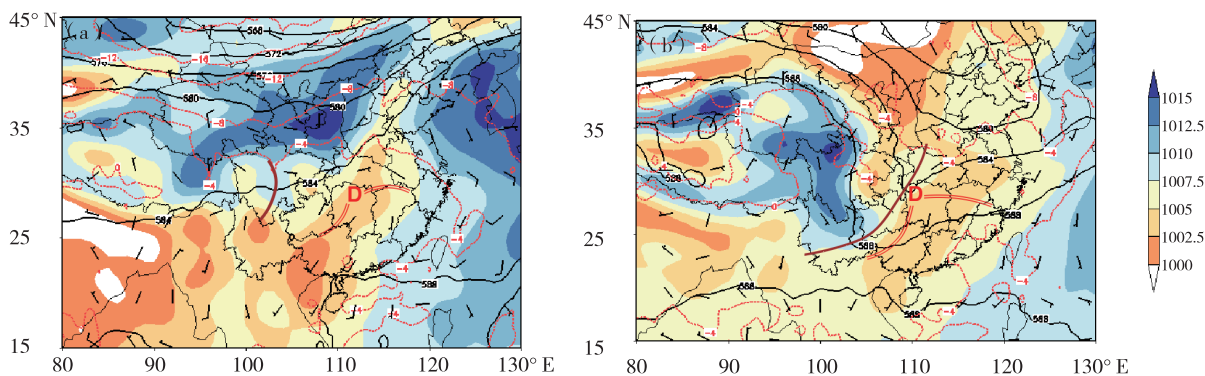


图1 500 hPa 高空图(等值线为位势高度,单位为 dagpm;填色图为海平面气压场,单位为 hPa)
(a. 6月8日20时;b. 7月27日20时)

Fig. 1 500 hPa altitude map (contour line is geopotential height, unit: dagpm; color map is sea level pressure field, unit: hPa) (a. 20:00 on June 8th; b. 20:00 on July 27th)

3 大气环境背景场分析

3.1 冷空气

因为2次过程均有冷空气配合影响,假相当位温 θ_{se} 是表征大气温湿参量的物理量^[7]。下面从假相当位温、冷暖平流的分布情况,分析冷空气对这2次过程的具体影响。2次过程表现出3点差异。(1)冷空气强度:“6·8”过程的冷空气强度明显弱于另一次过程。“6·8”过程中路偏东路径冷空气在从北方南下渗透过程中不断减弱,冷平流影响湘北地区时强度减弱,而湖南大部位于地面暖倒槽内,且倒槽不断向北发展,冷空气对于本次降水过程是有利的。“6·8”过程从地面到400 hPa θ_{se} 随高度减小,气层不稳定,弱冷空气受动力抬升,但因其势力不强,使得冷暖气流在湘北地区充分交汇,且偏北风风速不大,回波移动速度缓慢,造成了本地短时强降水的发生。(2)冷空气影响的高度:“7·26”过程高于“6·8”过程,伸展到400 hPa左右,且呈现“冷—暖—冷”的结构。(3)冷空气影响时间:“7·26”过程湘北地区转北风时间过早。“7·26”过程(空报)受西路弱冷空气势力影响,其冷空气影响时间过早,地面图上26日08时常德境内所有国家站均受偏北风控制,此时高层700 hPa以上 θ_{se} 随高度升高,大气层结稳定。26日14时湘北地面为冷平流中心,中心强度达 $-10 \times 10^{-5} \text{K} \cdot \text{s}^{-1}$,形成了强大且稳定的冷垫,暖空气主动沿冷空气爬升,

在沅水流域形成稳定性降水。“7·26”过程冷空气势力过强(地面辐合线位于湘中地区),造成实际雨带明显偏南,最后导致湘北北部出现明显空报。通过2个过程对比分析,大范围的强降水过程前期,预报员需仔细斟酌评估冷空气对强对流发生的利与弊,冷空气影响时间过早并且偏北风过大的情况应考虑暴雨落区偏南或调低降水量等级,需通过实况进行订正。

3.2 水汽条件

大暴雨的产生需要大量的水汽输送及辐合,并且要有较小的温度露点差^[8]。选取2次过程湘北周围4个探空站(长沙、怀化、恩施、宜昌)各层次上的温度露点差,26日20时长沙、怀化(南部)水汽条件较差,925~700 hPa温度露点差均 $> 4^\circ\text{C}$,特别是长沙站500 hPa温度露点差达到了 19°C ,从怀化站7月26日20时探空图来看,整层仅500~600 hPa相对湿度 $> 80\%$,湿层浅薄,整体水汽条件较差,不利于暴雨产生。6月8日4个测站温度露点差均 $< 4^\circ\text{C}$,空气达到近似饱和的状态,湿度条件明显优于“7·28”过程,为暴雨的产生提供了充沛的水汽条件。从卫星云图来看,7月26日20时常德上空有一高空槽云系,冷空气南下的后部(陕西到湖北)为宽广干区,此区域内以下沉运动为主,边界都向西凸出,中高层水汽条件不好,西南风急流未建立,冷空气阻隔了水汽输送。

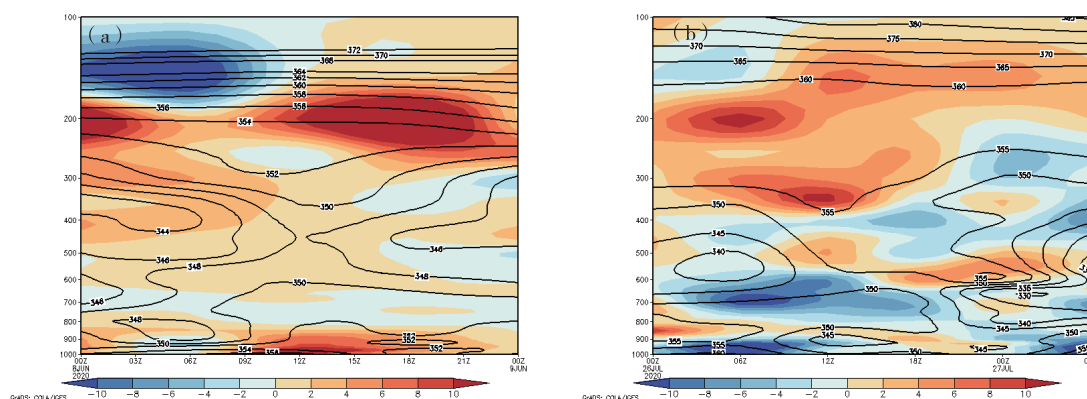


图 2 2020 年 6 月 8 日 (a) 和 7 月 26 日 (b) 温度平流和假相当位温时间—高度剖面图
(填色:温度平流,单位: $10 \times 10^{-5} \text{K} \cdot \text{s}^{-1}$;等值线:假相当位温,单位:K)

Fig. 2 Temperature advection and pseudoequivalent potential temperature time – height profiles on June 8 (a) and July 26 (b) 2020 (color: temperature advection, unit: $10 \times 10^{-5} \text{K} \cdot \text{s}^{-1}$; contour line: pseudoequivalent potential temprature, unit: K)

用 FNL 再分析资料对 26 日 14 时—27 日 08 时水汽变化进行分析。26 日 14—20 时常德大部比湿在 $10 \sim 12 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 水汽条件充沛, 结合雷达回波图分析, 26 日 16 时从湘西移来片状混合性降水回波, 移入后强度明显增强, 但为分散点状或小范围块状强回波, 对应 850 hPa 低涡切变移动的右前方, 地面在湘西北地区有地面辐合线, 有利于对流的触发。但从 27 日 02 时开始, 鄂西南地区 700 hPa 已出现明显西南—东北向的干区并不断向南扩展, 常德北部比湿在不断减小, 石门西北部比湿为 $6 \sim 8 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 此时比湿大值中心位于怀化并呈西南—东北向延伸至湘中偏北地区, 整个雨带已明显偏南。27 日 08 时比湿分布图显示常德澧水流域大部比湿为 $4 \sim 6 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 沅水流域比湿在 $6 \sim 8 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 干区逐渐扩大, 且西南方向湿舌范围和强度均有较大幅度减弱。

表 1 湘北周围 7 月 26 日 (上) 20 时和 6 月 8 日 (下) 20 时的温度露点差 (单位: $^{\circ}\text{C}$)

Tab. 1 Temperature dew point difference

between 20:00 on July 26 (upper) and 20:00

on June 8 (lower) in northern Hunan (unit: $^{\circ}\text{C}$)

$T - T_d$	长沙	怀化	恩施	宜昌
925 hPa	1	7	3	1
850 hPa	3	6	1	1
700 hPa	3	5	3	0
500 hPa	19	3	4	0
$T - T_d$	长沙	怀化	恩施	宜昌
925 hPa	3	3	2	2
850 hPa	2	2	0	1
700 hPa	1	2	0	1
500 hPa	2	2	5	1

造成暴雨所需的水汽往往由低层强盛西南急流提供, 水汽通量散度变化能很好地反映水汽的汇集情况^[9]。“7·26”过程, 26 日 20 时 850 hPa 在湘西北地区有 3 支气流在此汇聚, 引发水汽辐合, 水汽通量散度辐合中心在常德市沅水流域上空, 北部受弱冷空气影响为偏北风控制, 而南面有一支南风水汽输送带, 可以看出在这条水汽带上, 在湘中以及湘东北地区已有 2 个水汽通量辐合区域, 实况未形成西南急流, 以致于常德北部的水汽条件较差, 本次过程的强回波在这条水汽带上不断生成并向东北方向移动, 而此时, 常德偏北区域内已出现水汽辐散区, 不利于澧水流域出现强降水。2 次过程的暴雨区均出现在水汽辐合中心区域附近, “6·8”过程, 850 hPa 上有 2 支水汽输送带: 副热带高压西北侧的西南风进入内陆后转向为东风或东南风, 在长江流域至湖南北部与西南急流形成气旋性辐合, 一支将孟加拉湾的水汽输送至华南—江南一带, 另一支将副热带高压西北侧的水汽从南海输送至湖南上空, 强烈的暖湿急流使得湖南上空形成高能高湿的大气不稳定层结。

2 次过程 EC 模式多个时次低涡位置具有不确定性, 预报员将关注重点放在低涡位置变化, 主观将强降水中心定在低涡中心, 而忽略了暴雨产生的另一个重要条件——水汽 (主观认为南方水汽充沛), 导致了此次过程的空报。

由 2 次过程的水汽条件对比来看, “7·26”过程实况中层出现干区并不断扩大是出现空报的主要原因之一。“6·8”过程无论是水汽条件还是形势场给出的预报信息均较弱。下面从动力抬升方面探讨出现局地性的大暴雨的原因。

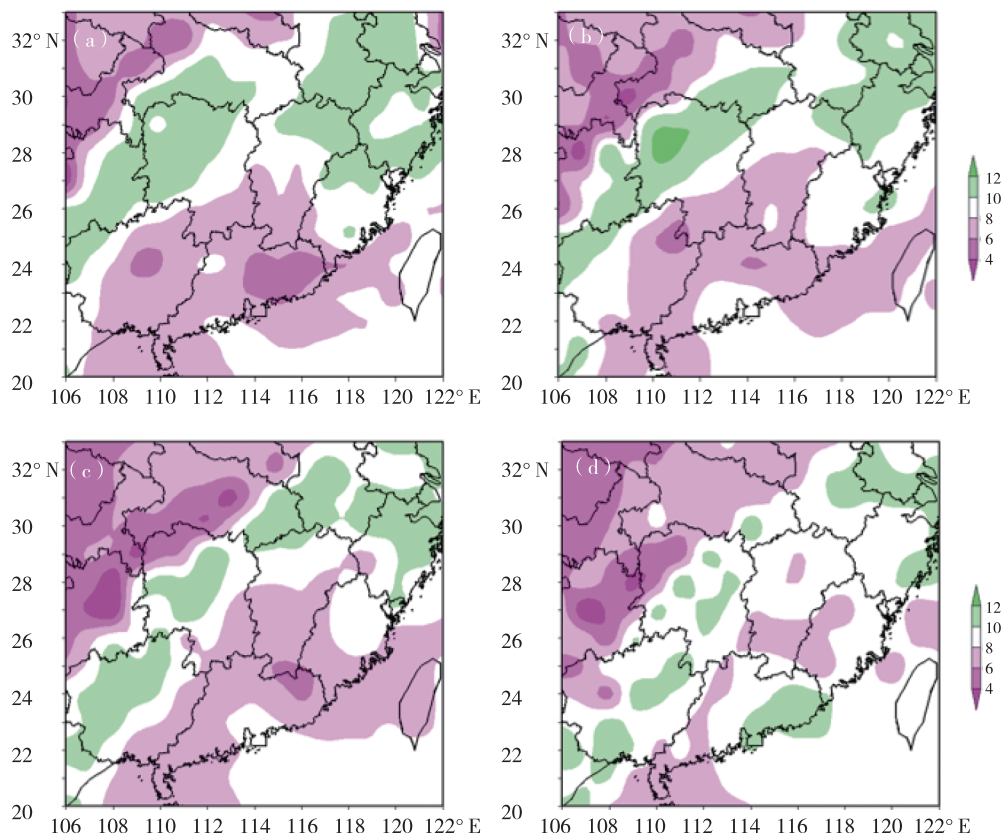


图3 FNL 资料比湿时间变化图(a:26 日 14 时;b:26 日 20 时;c:27 日 02 时;d:28 日 08 时)
Fig. 3 Change of FNL data specific humidity time(a:14:00 on July 26;
b:20:00 July 26;c:02:00 on July 27;d:08:00 on July 28)

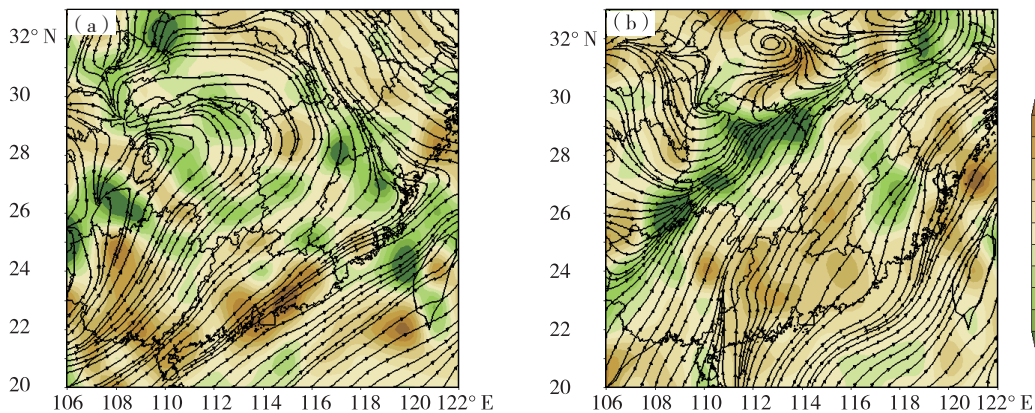


图4 6 月 8 日 14 时、7 月 27 日 02 时 850 hPa 水汽通量散度(a)和 850 hPa 流场(b)
Fig. 4 Water vapor flux divergence and flow field at 850 hPa at 14:00 on June 8(a) and 02:00 on July 27(b)

3.3 动力条件

图 5 来看,在 8 日 12 时地面有浅薄冷平流,强度较弱,为 $-4 \sim -2 \times 10^{-5} \text{ K} \cdot \text{s}^{-1}$,这股浅薄冷空气渗入正是由于中层东北风的入侵造成的。强对流发生之前,地面气温回升至 $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右,此时近地面的暖倒槽不断发展,地面偏东风携带干冷空气入侵倒槽,触发了暖倒槽中不稳定能量的释放,是此次强对流天气发展旺盛的主要触发机制^[10]。

从垂直剖面图来看,偏东风作用在迎风坡上,中低层的暖湿气流在浅薄冷空气和中尺度地形迎风坡作用下造成气旋性辐合,在山前激发出强盛的上升气流,对降水产生明显的增幅作用^[11]。姚秀萍等^[12]研究表明,30°N 以北的正环流下沉支是干冷空气输送的载体,干冷空气的输入是湿度锋形成和维持的一个重要的动力和热力原因。从图 5 可以看出,其上空强的垂直上升速度延伸至 200 hPa 附近,

从温度平流剖面来看,在低层浅薄冷空气之上叠加暖平流—冷平流,“6·8”过程中高层为一致偏南风携带暖湿气流,与 30°N 以北中层冷平流下沉支冷暖交汇,加大对流不稳定,在中层加剧了上升运动,有利于强对流天气维持。“7·26”过程,800 hPa 以下维持弱的上升运动,而其上在 400 hPa 左右出现

一支较强的下沉气流,对应温度剖面上 800 ~ 600 hPa 上出现的较强的冷平流,其中心强度达到了 $-10 \times 10^{-5} \text{ K} \cdot \text{s}^{-1}$,抑制了上升气流的发展。对应雷达 26 日 00 时左右 VAD 风廓线产品,在此高度上“ND”数据变多,表明出现相对干区,水汽输送条件变差,不利于强降水的维持(图 6)。

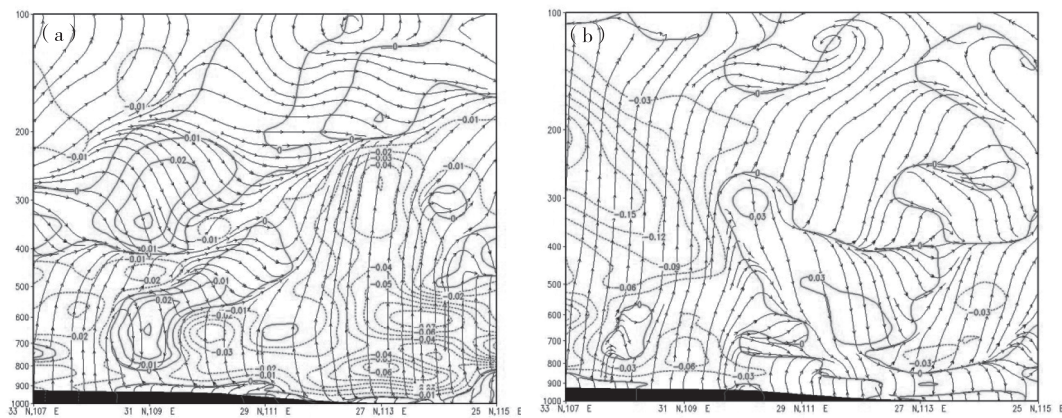


图 5 2020 年 6 月 8 日 20 时(a)和 7 月 26 日(b)沿(29°N,111°E)经度—高度垂直剖面图

Fig. 5 Vertical sections along (29°N, 111°E) longitude-height at 20:00 on 8 June (a) and 26 July (b) 2020

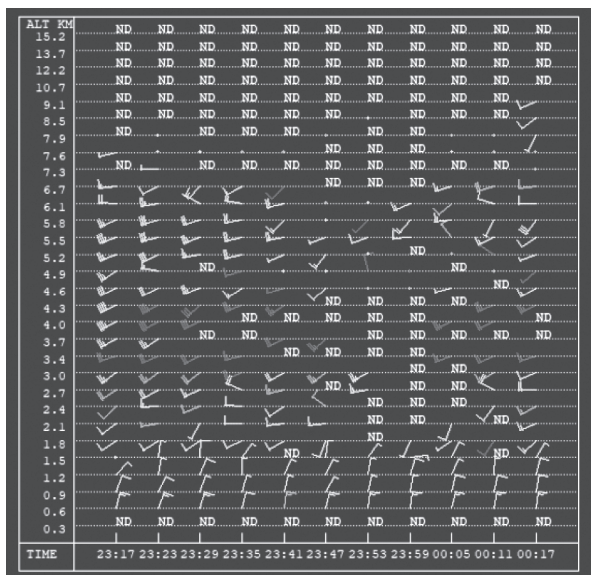


图 6 2020 年 6 月 27 日 00 时常德站雷达风廓线产品

Fig. 6 Radar wind profile products of Changde station at 00:00 on June 27, 2020

4 结论与讨论

本文通过对 2020 年 6 月 8 日(漏报)和 7 月 26 日(空报)有冷空气配合下预报效果不佳的 2 次过程进行了对比分析,得到的主要结论如下:

(1)2 次过程的共同点在于中高纬环流形势大致相同,有冷空气配合,有低涡、切变线影响。“6·

8”过程偏东风带动浅薄冷空气缓慢渗透南下,是局地短时强降水触发和维持的主要原因之一;“7·26”过程冷空气相较于模式预报影响较早,冷平流强度、厚度过强,阻隔了水汽向北输送,层结较为稳定,中层为下沉气流控制,不利于湘北强对流天气的触发,整条雨带位置偏南。预报员应该把握好不同冷空气强度下强降水的落区订正,不能盲目采信模式预报,而应该在平时多积累冷空气配合下的强降水预报经验,并从降水形成的 3 个根本条件出发仔细分析天气实况得出准确的预报结论。

(2)预报员将 2 次过程关注重点放在低涡位置的变化,主观认为低涡中心即为强降水中心,而未考虑暴雨产生的其它各个要素之间的配合,对模式临近的订正能力也较弱。对于“6·8”过程,全球模式预报副热带高压 8 日夜间接加强北推的趋势,同时地面暖低压加强向东北伸展,预报员需提高对强降水环境背景场的敏感性,才能更好地对模式产品进行本地释用。“7·26”过程在卫星和雷达产品上,一是出现宽广干区,二是出现较多的“ND”,表明中层出现干层,预报员需充分应用多种监测产品,及时调整预报思路。

参考文献

- [1] 刘芸芸,丁一汇. 2020 年超强梅雨特征及其成因分析[J]. 气象, 2020, 46(11): 1393-1404.
- [2] 陈鹏,庞玥,张虹,等. 台风与冷空气对重庆“9.17”大暴雨的影

- 响分析[J]. 暴雨灾害,2017,36(3):227-234.
- [3] 李志楠,郑新江,赵亚民,等. 9608号台风低压外围暴雨中尺度云团的发生发展[J]. 热带气象学报,2000,16(4):316-326.
- [4] 张雪蓉,王丽芳,王博妮,等. 干冷空气对江苏热带低压倒槽大暴雨影响的数值试验[J]. 气象,2021,47(7):791-804.
- [5] 彭晶晶,马红云,朱歆炜,等. 1961—2017年湖南省冷空气活动特征分析[J]. 科学技术与工程,2019,19(4):43-51.
- [6] 曾妮,方鹏,蒙军,等. 一次暖区暴雨天气过程分析[J]. 中低纬山地气象,2022,46(3):32-38.
- [7] 杨群,胡萍,张李娟,等. 受两路冷空气共同影响下的铜仁暴雨特征分析[J]. 中低纬山地气象,2022,46(2):18-26.
- [8] 黄思先,王保,翟红楠. 2019年5月湖北东部一次大暴雨过程诊断分析[J]. 沙漠与绿洲气象,2021,15(3):38-45.
- [9] 雷蕾,孙继松,王华,等. 回流冷空气与地形相互作用背景下的局地对流暴雨[C]//第三届首都气象论坛论文集,2013:110-124.
- [10] 孙继松. 短时强降水和暴雨的区别与联系[J]. 暴雨灾害,2017,36(6):498-506.
- [11] 昌立伟,贾岸斌,黄卓禹. 偏东风和地形的相互作用对湖南极端强降水的影响分析[J]. 中低纬山地气象,2019,43(5):36-41.
- [12] 姚秀萍,于玉斌. 2003年梅雨期干冷空气的活动及其对梅雨降水的作用[J]. 大气科学,2005(6):131-143.

(上接第60页)

- [6] 杜安妮,陈阳权. 乌鲁木齐机场1次短时雷雨大风天气特征及成因分析[J]. 气象水文海洋仪器,2021,38(4):59-62.
- [7] 陈丽丽,马中元,彭景,等. 靖安县雷暴大风天气与回波特征分析[J]. 气象水文海洋仪器,2021,38(1):23-26.
- [8] 周虹,高青云,李晓容. 南充雷暴大风天气学概念模型和环境物理量分析[J]. 高原山地气象研究,2018,38(4):53-59.
- [9] 张超,周艳,杨帆,等. 黔东南山区两次雷暴大风过程对比分析[J]. 贵州气象,2016,40(3):37-42.
- [10] 俞小鼎. 强对流天气临近预报[R]. 北京:中国气象局培训中心,2012:93.
- [11] 农孟松,翟丽萍,屈梅芳,等. 两种雷暴大风的结构特征及其环境条件对比分析[J]. 气象研究与应用,2019,40(2):1-6.
- [12] 王秀明,俞小鼎,周小刚,等. “6.3”区域致灾雷暴大风形成及维持原因分析[J]. 高原气象,2012,31(2):504-514.
- [13] 敖泽建,傅朝,蒋友严,等. 甘南高原“4·15”冰雹天气的多普勒雷达特征分析[J]. 沙漠与绿洲气象,2017,11(2):27-33.
- [14] 章国材. 强对流天气分析与预报[M]. 北京:气象出版社,2011.
- [15] 王彦,吕江津,王庆元,等. 一次雷暴大风的中尺度结构特征分析[J]. 气象,2006,32(2):2882-2888.
- [16] 李胜山,张殿江,胡玲,等. 一次下击暴流显著弓形回波特征[J]. 气象与环境学报,2012,28(4):84-89.