

文章编号: 2096-1618(2020)06-0704-09

陕北榆林两次夏季暴雨过程的对比分析研究

李姗姗, 侯柯然, 李晓利, 康磊

(陕西省榆林市气象局, 陕西榆林 719000)

摘要:利用自动气象站常规观测资料、MICAPES、NCEP FNL $1^\circ \times 1^\circ$ 再分析资料, FY-2G 红外云图, FY-2G TBB 资料、CB 多普勒雷达 VCP21 模式资料对陕北榆林 2019 年 7 月 28–29 日、2019 年 8 月 2–4 日两次暴雨过程进行对比分析研究。结果表明: (1) 前者副高西伸北抬, 与西风槽带来的冷空气在陕北北部交汇, 配合近地层切变线、辐合线的触发, 促成了对流性暴雨的生成。后者为西风槽配合中低空强的气旋性辐合系统, 低层东路冷空气及台风外围水汽的输送, 为系统性暴雨形成的有利条件。 (2) 中层干空气侵入和低层冷垫都有利于降水加强, 暴雨易出现于 θ_{se} 陡峭和密集区; 高值位涡柱下侵位置对两种类型暴雨有指示意义, 700 hPa 湿正压与湿斜压的正负值过渡区对应暴雨的落区。 (3) M β CS 与涡旋云系中心对应暴雨强降水区。 (4) 当 CR 回波强度达 50 dBz, VIL 达 30 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$, 对应区域会出现短时强降水。当负速度面积大于正速度面积, 零速度线呈 S 状, 回波强度 35 ~ 45 dBz, 叠加逆风区有利于大面积强降水形成; 当零速度线呈折角, 表示有冷锋经过, 配合 45 dBz 左右回波强度, 冷锋经过地区降水加强, 有利于形成系统性暴雨。

关键词:对流性暴雨; 系统性暴雨; 对流不稳定; 湿位涡; 零速度线; 逆风区

中图分类号: P458.121.1

文献标志码: A

doi: 10.16836/j.cnki.jcuit.2020.06.018

0 引言

榆林位于西北地区东部、陕西省最北部, 黄土高原和毛乌素沙地交界处, 近十年夏季的暴雨类型多以短时暴雨为主^[1], 黄土高原西风带的弱冷空气与副热带高压西北侧的西南气流交汇时, 易触发对流^[2], 盛夏低纬度热带系统活动对西北地区暴雨有着重要的影响^[3], 陕北北部暴雨多出现在 700 hPa 切变线的右侧和地面辐合线或冷空气侵入的位置。靳莉君等^[4]发现假相当位温的变化反映了暴雨过程中冷暖空气的活动情况, 是暴雨预报的指标; 吴国雄等^[5]证明了湿位涡守恒特性, 并提出倾斜涡度发展理论, 由于湿等熵面倾斜导致暴雨发生; 李国平、寿绍文、张迎新、李静楠等^[6–9]发现湿位涡对某些暴雨有较好的指示意义。在实际业务中, 通常以卫星、雷达多种资料融合方式来开展暴雨的监测预警, 傅朝、王清平等^[10–11]研究表明, 暴雨主要发生在 TBB 等值线密集区和 $TBB \leq -52^\circ\text{C}$ 的区域, MCS 云团回波大于 50 dBz, 聂云等^[12]研究表明低于 -64°C 的云区, 正好对应强降雨时段。目前, 对于短时对流性暴雨特征研究较多, 但是对于持续时间较长的系统性暴雨特征研究较少, 而暴雨极易诱发山洪、滑坡、泥石流等次生灾害^[13], 持续时间较长的系统性暴雨易被忽视, 但可能造成的损失更大, 所以其与对流

性暴雨的对比性特征研究显得尤为重要。

选取 2019 年 7 月 28–29 日和 2019 年 8 月 2–4 日发生在榆林的两次暴雨过程, 通过对环流形势、假当位温、卫星红外云图及 TBB、湿位涡、雷达产品的对比分析, 总结两种不同性质暴雨的特征异同, 为该地区不同类型暴雨落区及强度预判提供有益的思路和方法。

1 暴雨过程概况及大尺度环流背景

暴雨过程概况, 两次暴雨均属于夏季暴雨, 2019 年 7 月 28–29 日暴雨过程与 2019 年 8 月 2–4 日暴雨过程持续时间不同, 前者持续 1 d, 后者持续 3 d; 降水性质不同, 前者主要为对流性降水, 后者主要为系统性降水。将 2019 年 7 月 28–29 日对流性暴雨过程记为过程 A, 2019 年 8 月 2–4 日系统性暴雨过程记为过程 B。

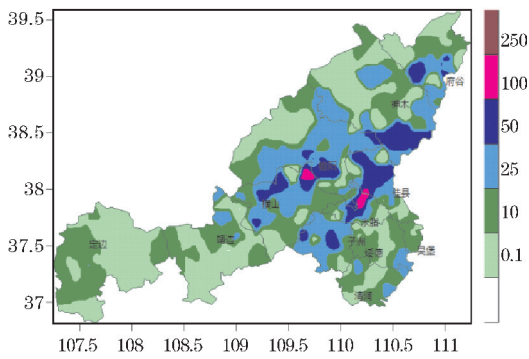
过程 A 的降水量分布图如图 1(a), 榆林市雨情监测站共出现 4 站大暴雨, 36 站暴雨, 66 站大雨, 最大降水量出现在横山区白界镇站, 为 154.4 mm。由自动气象站逐小时降水资料显示, 强降水集中在 28 日 17:00–19:00, 29 日 01:00–02:00。7 月 28 日小时最大降水量出现在横山区白界站 $68.7 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ (18:00–19:00), 7 月 29 日小时最大降水量出现在米脂县高西沟站 $58.1 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ (01:00–02:00)。

过程 B 的降水量分布图如图 1(b), 2 日 20:00–4 日

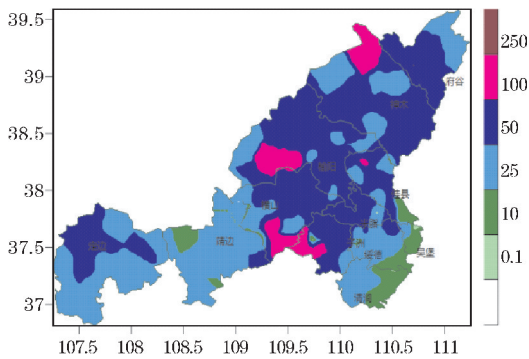
收稿日期: 2020-06-21

基金项目: 陕西省气象局秦岭和黄土高原生态环境气象重点实验室开放研究基金资助项目 (2019Z-4)

14:00榆林市雨情监测站共出现 143 站暴雨,14 站大暴雨,最大降水量出现在榆阳区巴拉素镇站,为147.9 mm。此次降水主要过程发生在 3 日白天和夜间,过程降水量大于100 mm的站点出现在榆阳、神木、横山、子洲、佳县 5 个县市区,小时最大降水量出现在榆阳区巴拉素镇 $64.5\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ (3 日 23:00–4 日 00:00)。



(a) 过程 A 降水量分布

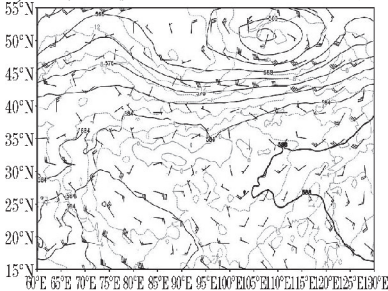


(b) 过程 B 降水量分布

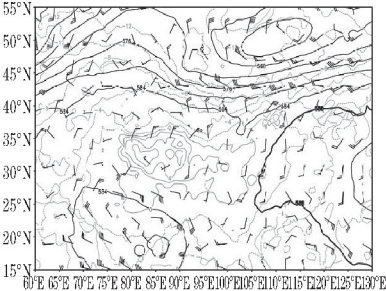
图 1 降水量分布

2 环流形势分析

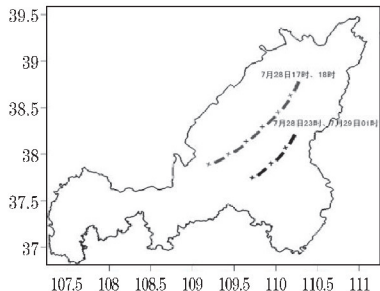
图 2(a)、(b)分别为过程 A 中 7 月 28 日 08:00、20:00 天气图,由图可知,28 日 08:00,500 hPa榆林处于贝加尔湖冷涡底部,受槽前西南气流控制,陇中有短波槽,副高 588 线西伸至川西 32°N , 100°E 附近,北伸到延安南部; 700 hPa、850 hPa 有西南风速带。到 20:00,冷平流使 588 线略微东退南压,陇中的短波槽



(a) 28 日 08:00 500 hPa 位势高度场、温度场及 700 hPa 水平风场



(b) 28 日 20:00 500 hPa 位势高度场、温度场及 700 hPa 水平风场



(c) 28 日 17:00、18:00、23:00、29 日 01:00 地面辐合线

图 2 过程 A 环流形势

加深发展东移至河套西部地区;700 hPa 宁夏南部–榆林北部出现了切变线,且增加了一条东南风速带,此时榆林比湿为 $12\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$;由图 2(c)可知,地面图上辐合线由榆林东北部移至东南部,地面辐合线触发对流产生,在对应区出现强降水。29 日 08:00 后 588 线东退移出陕西省,短波槽移至榆林东部;700 hPa 偏南气流转变为偏北气流,切变线移至榆林东部,850 hPa 也转为偏北气流;地面图上,转为高压前部控制,整体降水趋于结束。

图 3 为过程 B 中 8 月 2 日 08:00、20:00,8 月 3 日 08:00、20:00 的天气图。由图可知,2 日 08:00,500 hPa 副高位于东海一带,第 7 号台风“韦帕”已登陆海南,热带风暴级风力达 $23\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。中纬度受 584 线控制,四川北部至陇南有一横槽,河套北部有一横向小槽;20:00,位于陇南的横槽加强东移与河套槽合并,形成一东北西南向槽,同时台风主体外围形成一支强的偏南气流将水汽输送至陕北地区。榆林位于槽前,强的辐合中心位于陇南至宁夏南部,偏南气流最大风力为 $22\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$; 3 日 08:00,500 hPa 低槽东移转竖,强气旋辐合中心移入陕北,台风继续西移,偏南气流持续将水汽输送至陕北,850 hPa 有东路回流冷空气。3 日 20:00,500 hPa 低槽继续东移,强辐合中心位于榆林,台风继续西移;对应 700 hPa 和 850 hPa 河套为强的气旋性辐合区,700 hPa 有一支强的偏南气流持续输送水汽,850 hPa 有东路冷空气影响河套,冷暖空气在河套西部形成温度梯度,榆林比湿达 $10\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。4 日 08:00(图略),500 hPa 低槽东移,气旋性辐合中心北抬移出榆林;700 hPa 气旋性切变北抬,偏南气流明显减弱,水汽输送切断,降水趋于结束。

综上,过程 A 为副高外围偏南暖湿气流影响下的,地面低压东北部暖区降水,榆林整体处于地面辐合场中,有利于对流性降水的发生,近地层切变线、辐合线的生成、发展与降水地区紧密对应,是造成强对流性暴雨的有利条件。过程 B 主要是西风槽配合中低空强的气旋性辐合系统,低层东路冷空气及台风外围水汽的输送,为本次系统性暴雨的形成条件。

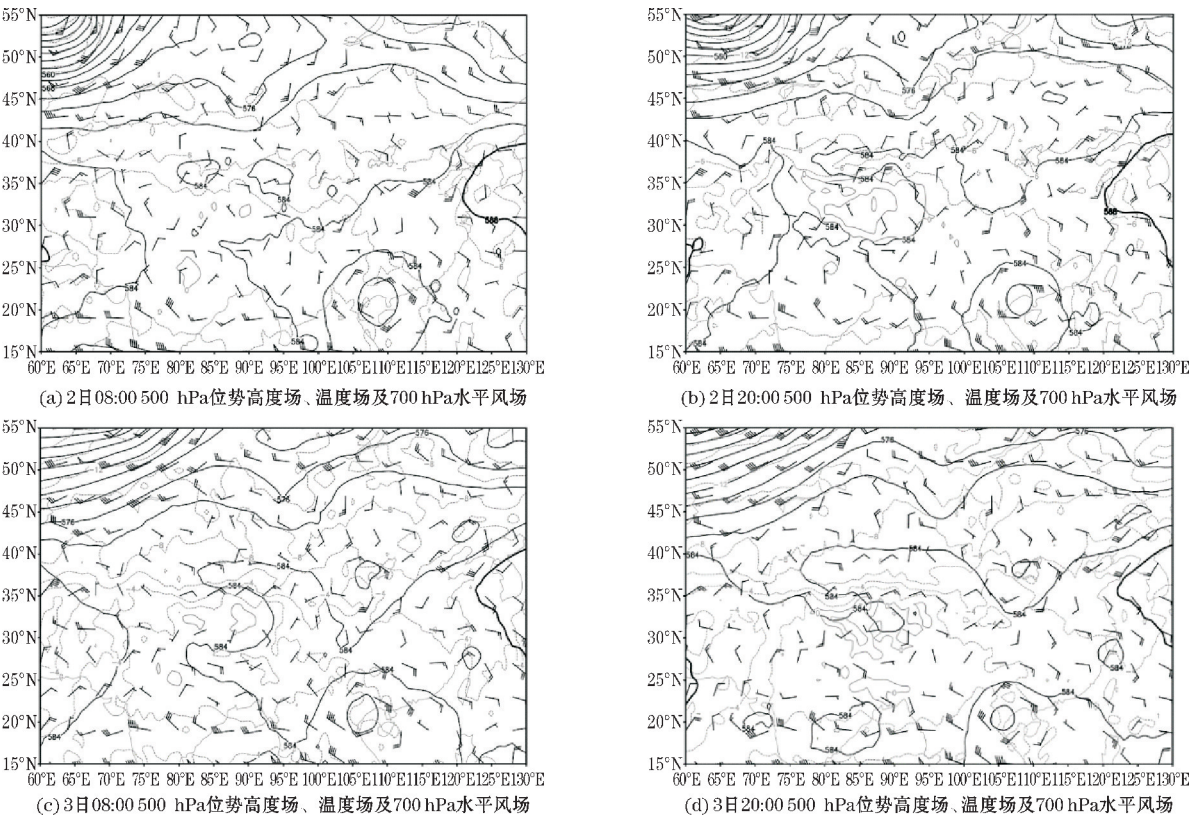


图3 过程B环流形势

不稳定增强,易触发对流,与杨淑楠等^[16]和白涛等^[17]的结论一致。

3 不稳定性分析

3.1 对流不稳定

3.1.1 中层干冷空气入侵,易触发对流

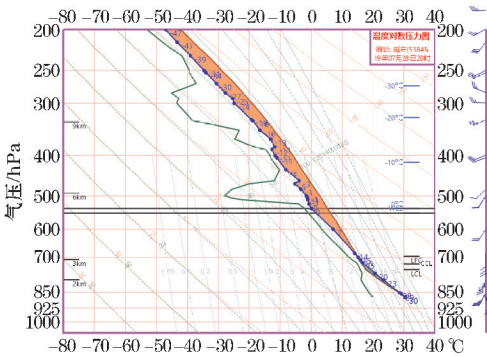
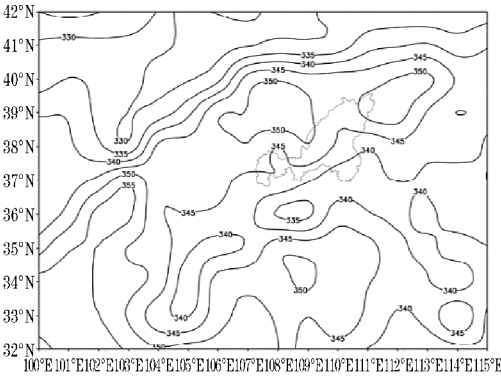
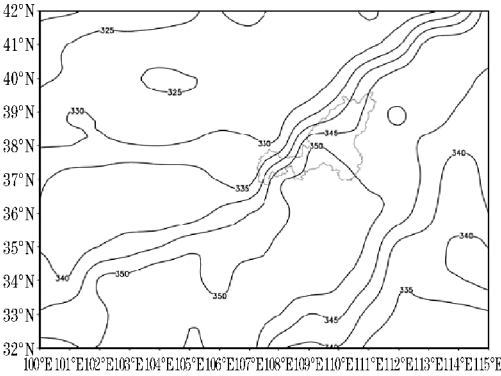


图4 过程A中28日20:00延安站T-lnp图

延安探空站08:00、20:00的对流有效位能CAPE值分别为 $1514.4\text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $1885.3\text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$ 不稳定能量强,图4显示在550~450 hPa层,湿度线呈喇叭口状向右张开,有明显冷空气入侵。形成了中层相对较干、低层相对较湿的垂直配置结构。从风垂直切变显示从地面到500 hPa是一个明显的顺时针旋转,另外从850 hPa的温度场和湿度场可知,榆林处于 $24\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度脊中,比湿为 $11\sim13\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,低层有暖平流且湿度较大,中层配合干冷空气侵入,使大气热力不稳定和层结



(a) 28日20:00假相当位温 θ_{se} 分布



(b) 29日02:00假相当位温 θ_{se} 分布

图5 过程A中假相当位温 θ_{se}

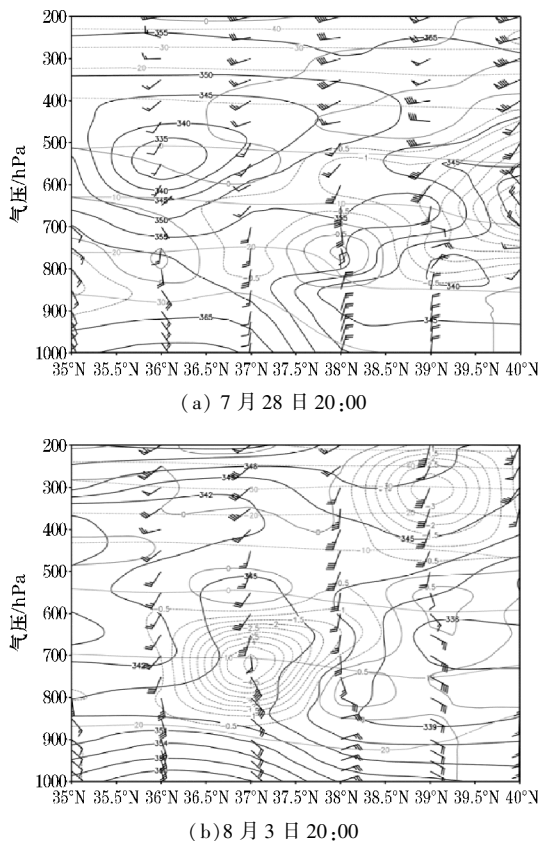


图 6 过程 A、B 中 θ_{se} 、温度、垂直速度、水平风场沿 109 °E 径向剖面(粗实线为等假相当位温线,平直线为等温线,闭合等值线为垂直速度、风羽)

从图 5(a)可知,28 日 20:00 在陇中有一明显的位温深槽,说明在陇中中层有强的冷空气。河套西部、榆林北部有 350 K 假相当位温高值中心,在榆林西部有一浅槽,到 29 日 02:00 如图 5(b)所示,内蒙古西部有 325 K 低值中心,陇中深槽变得宽广,向东移至河套中部榆林西北部,原河套西部、榆林北部的假相当位温高值中心消散,位温下降为 335 K、345 K,得知 20:00–02:00 榆林有来自西北部冷空气的入侵,与南部凸起的位温高脊形成对峙。

图 6(a)显示,28 日 20:00,850 hPa 以下温度大于 20 °C,在 550 ~ 450 hPa 层,假相当位温值南部小于北部,与图 4 结论一致;另从图 6(a)还可得知 28 日 20:00 开始榆林市有明显的垂直上升气流,最大垂直速度为 $-1 \text{ pa} \cdot \text{s}^{-1}$,强的上升气流促使暴雨的形成。图 6(b)中可得知,在我市西部、北部,垂直速度达 $-4.5 \text{ pa} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $-3 \text{ pa} \cdot \text{s}^{-1}$,且图 6(a)、(b)两图均可看出暴雨出现在 θ_{se} 陡峭和密集区,在其附近都有垂直上升速度大值区与之对应。

3.1.2 850 hPa 东路冷空气回流形成冷垫,有利于上层气流抬升

图 6(b)显示,在 850 hPa 附近,有 339 K 假相当位温低值区,自东向西呈斜楔状,且根据风羽方向此时底层为偏东风,说明此时 850 hPa 有一股偏东气流,

339 K 假相当位温低值区对应的垂直上升速度为 $0.5 \text{ pa} \cdot \text{s}^{-1}$,此时这股回流冷空气在榆林市下沉形成冷垫。700 hPa 有垂直速度达 $-4.5 \text{ pa} \cdot \text{s}^{-1}$ 的暖湿气流遇此冷垫沿其抬升,加强了向上的动力作用,有利于降水的产生。

3.2 对称不稳定

湿位涡的计算及分析。湿位涡的计算方法主要根据吴国雄等^[5]所提出的湿位涡守恒方程,即在斜压大气中,如果不计非绝热加热和摩擦的作用,湿位涡具有守恒性。考虑大气的垂直速度的水平速度的垂直切变小得多,忽略 ω 的水平变化时, p 坐标下湿位涡守恒方程为:

$$MPV = -g(\xi_p + f) \frac{\partial \theta_{se}}{\partial p} + g \frac{\partial v}{\partial p} \frac{\partial \theta_{se}}{\partial x} - g \frac{\partial u}{\partial p} \frac{\partial \theta_{se}}{\partial y} = \text{const} \quad (1)$$

$$MPV1 = -g(\xi_p + f) \frac{\partial \theta_{se}}{\partial p} < 0 \quad (2)$$

$$MPV2 = g \frac{\partial v}{\partial p} \frac{\partial \theta_{se}}{\partial x} - g \frac{\partial u}{\partial p} \frac{\partial \theta_{se}}{\partial y} > 0 \quad (3)$$

有两个分量, $MPV1$ 和 $MPV2$, 其中 $MPV1$ 是垂直分量,其值取决于空气块绝 MPV 对涡度的垂直分量与假相当位温的垂直梯度的乘积 (ξ_p 为垂直方向涡度, f 为地转涡度, θ_{se} 为假相当位温), 为湿正压项,当大气是对流不稳定时, $\frac{\partial \theta_{se}}{\partial p} > 0$, $MPV1 < 0$ 。 $MPV2$ 是等压面上的水平分量,为湿斜压项,数值由风的垂直切变和 θ_{se} 的水平梯度决定。湿位涡的单位为 PVU ($1 \text{ PVU} = 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{K} \cdot \text{kg}^{-1}$)。

根据两次暴雨过程发生的时间,利用 NCEP FNL $1^\circ \times 1^\circ$ 再分析资料。计算 950 ~ 200 hPa 层湿位涡中湿正压项 $MPV1$ 、湿斜压项 $MPV2$ 和沿 110.3°E 空间分布。

图 7(a)、(b) 分别为过程 A 湿位涡正压项 $MPV1$ 和斜压项 $MPV2$ 沿经向 110.3°E 的垂直剖面图,图 7(c)、(d) 分别为过程 B 为湿位涡正压项 $MPV1$ 和斜压项 $MPV2$ 沿经向 110.3°E 的垂直剖面图。图 7(a) 中 550 ~ 450 hPa 层为 $MPV1$ 正值区,说明此层为对流稳定区,对流层中层有冷空气活动。550 hPa 以下, $MPV1$ 正值区向下面的暴雨区延伸,表明中层冷空气以高值位涡柱的形式向下入侵,与中下层 $MPV1$ 负值区相互作用,由于湿位涡守恒特性,引起倾斜涡度发展,促使不稳定能量及潜热能的释放,有利于暴雨产生,与赵宇等^[18]结论一致。在 $37\text{--}38^\circ \text{N}$, 700 hPa 层间为 $MPV1$ 负值区, 700 hPa 层 $MPV2$ 为正值区,米脂高西沟 01:00–02:00 小时降水量 58.1 mm (110.187°E ,

37.886 °N) 为强降雨中心,它位于湿位涡正压项 $MPV1$ 负值区与正值区等值线密集带过渡区,同时也位于湿位涡斜压项 $MPV2$ 正值区与负值区值线密集带过渡区内。由此得知过程 A 中 700 hPa 湿正压与湿斜压的正负值过渡区对应暴雨的落区,对暴雨有指示意义。图 7(c) 中,可看到在暴雨区上空 350 hPa 以上都为 $MPV1$ 正值区,对流层高层的冷空气以高值位涡柱

下侵,与中高层负值 $MPV1$ 相互作用,形成降雨。在过程 B 中 37 °N ~ 38 °N, 700 hPa $MPV1$ 值为 0, $MPV2$ 是正值区,说明过程 B 对流性很弱,但是存在弱的斜压不稳定,强降雨中心绥德吉镇在 19:00-20:00 小时降水量 31.3 mm (110.468 °E, 37.716 °N) 也位于湿位涡斜压项的正负值过渡区。

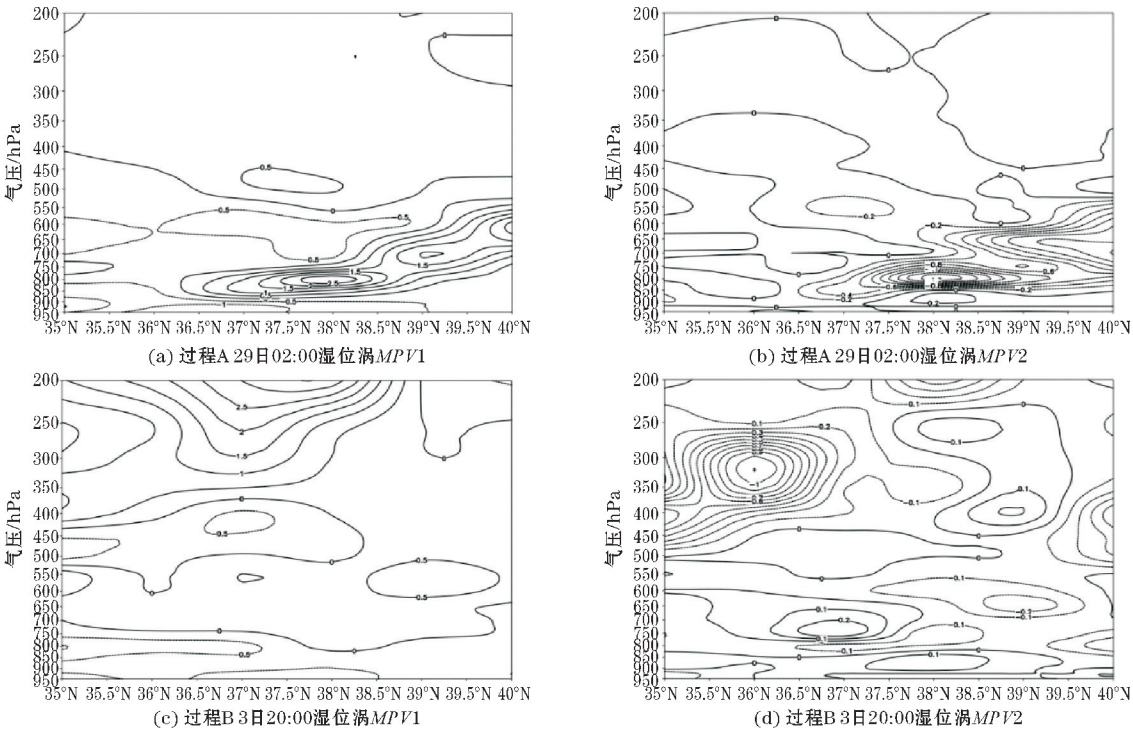


图 7 过程 A、B 湿位涡 $MPV1$ 、 $MPV2$ 沿 110.3°E 径向剖面图

4 卫星云图的中尺度特征

暴雨通常是有多尺度天气系统共同作用造成的,强对流暴雨是中尺度天气系统造成的^[14],各种天气尺度的发生、发展、消亡可以通过卫星云图展现。根据 Orlanski^[15] 尺度划分标准,可知 2 ~ 20 km 为中 γ 系统,20 ~ 200 km 为中 β 系统,200 ~ 2000 km 为中 α 系统。根据杨淑楠等^[16] 定义的方法,定义 $TBB \leq -32$ °C 为冷云罩,换算为开尔文温度为 $TBB \leq 241.15$ K 为冷云罩; $TBB \leq 52$ °C 为冷云区,换算为开尔文温度为 $TBB \leq 221.15$ K。通过分析 FY-2G 卫星红外云图及反演的 TBB 资料,对比分析两次暴雨过程中的中尺度对流系统。

如图 8 所示,过程 A 中 28 日 15:00 榆林西部 A 云团和北部的 B 云团发展成 M β CS,此时 TBB 在 232 K 左右,为冷云罩,对应地区开始出现降水;17:00 开始东北西南向地面辐合线发展并维持,A 云团向东北发展,B 云团向西南发展,18:00 时 C 云团开始发展并

东移,TBB 为 232 K,A 云团、B 云团的最低云顶亮温为 214 K,冷云区在移动方向的前沿,到 19:00,冷云罩面积不断扩大,A 云团追上 C 云团二者合并为 AC,B 云团不断发展向其靠近,AC 云团东部的前沿与 B 云团西南部前沿的 TBB 都迅速降为 214 K,此时两个 M β CS 移动方向前沿 TBB 等值线密集区梯度最大处产生了短时强降雨,18:00-19:00 横山区白界站小时降水量 68.7 mm;19:00-21:00,700 hPa 切变附近中北部小的对流单体云团连成一体形成 M β CS,东南部又有对流单体云团发展,冷云罩面积维持,多地出现短时强降雨,但是 M β CS 云团云顶亮温基本位于云团中心,移动不明显,TBB 等值线梯度不如 AC、B 云团大,雨强相对较小;21:00 后云团分裂,东移影响榆林市北部、东部黄河沿线地区;23:00 开始陇东-延安一带的云团向东北方向移动,榆林市地面辐合线也有东北向东南部移动,东南部县区降水强度增大,29 日 01:00-02:00 D 云团发展,对应米脂高西沟出现短时强降雨;03:00 后,北上的云团开始分裂、减弱,至 29 日 08:00,云团基本消失,此次强降雨趋于结束。综上,地面辐合线和切变

线触发并加强了 MβCS 发生发展,形成中尺度对流系统造成对流性强降水天气。MβCS 的冷云罩和冷云区范围与对流性暴雨区有较好的对应。对流性暴雨易出现于两个 MβCS 边缘相互靠近区且 TBB 等值线梯度大值区。

如图 9 所示,过程 B 中 2 日 15:00,高空槽云系中有多个中小尺度云系存在,云系的前锋位于河套西部,中纬度另有两条低槽云系,此时各条云系较独立,高空槽云系还未影响到榆林。19:00,高空槽云系东移,台风云系北移,与云系 B 连接,为之补充了水汽,而东北西南向的云系 B 已转向南北向。与高空槽云系相连接,为之补充水汽。2 日 19:00–3 日 10:00 台风向西北移动,其外围有水汽向高空槽补充,高空槽形成涡旋

状云系,云系内有中小尺度系统生成,榆林处于涡旋中心,降水强度明显增强。3 日 10:00–18:00 涡旋云系明显增强,不断有多个对流云单体发展补充。涡旋云系移动缓慢东移北抬,18:00 后,云系开始断裂,涡旋特征消失,19:00–20:00,米脂上空云顶亮温降低,TBB 等值线梯度大值区出现 4 站短时强降水。3 日 23:00–4 日 00:00 榆林北部的对流云系结构密实,移动缓慢,TBB 等值线梯度大值区巴拉素站出现 $64.5\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 的短时强降水。4 日 04:00 云系逐渐移出榆林,降水趋于结束。综上,从云系演变可以看出,此次降水整体为高空槽涡旋状云系,降水较均匀,局地强降水是由多个中小尺度对流单体云系造成的。

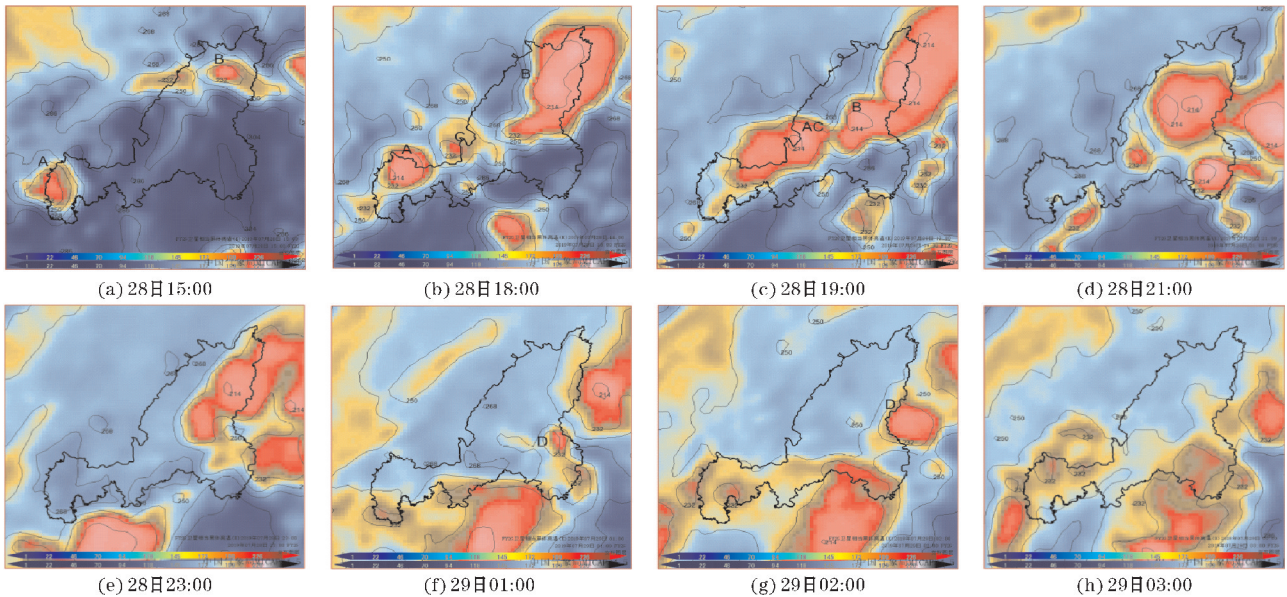


图 8 过程 A FY-2G 卫星红外云图及 TBB 演变

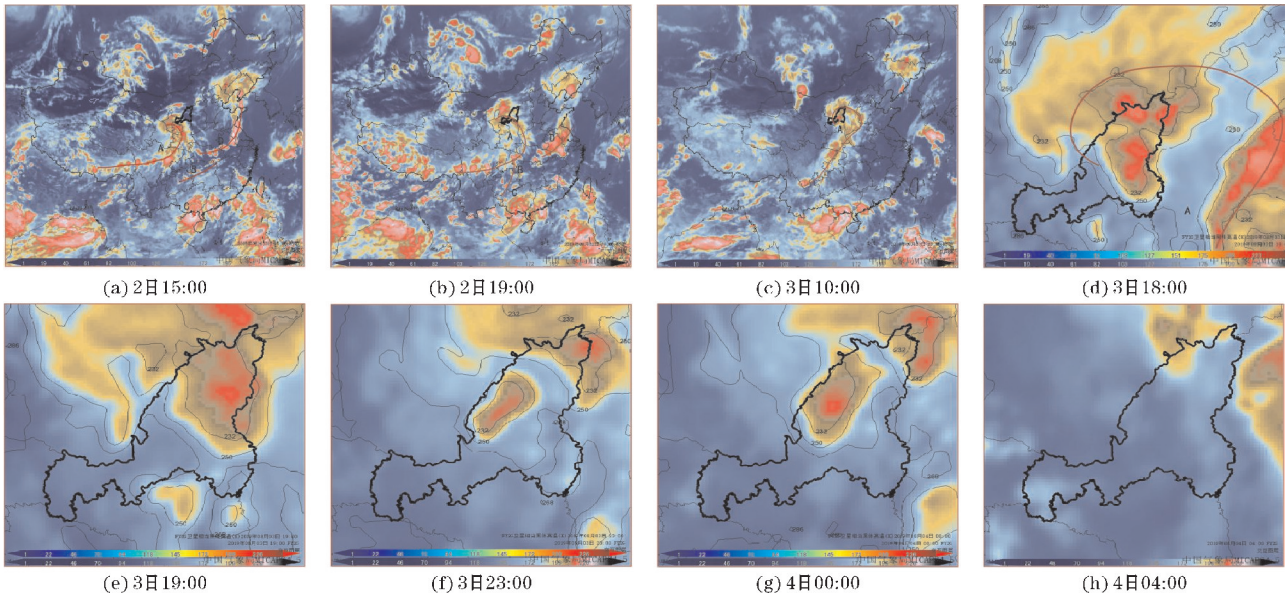


图 9 过程 B FY-2G 卫星红外云图及 TBB 演变

5 雷达图像分析

图 10 给出过程 A 中 7 月 28 日不同时次组合反射率因子 PPI 演变图及对性时次的垂直累计液态含水量 PPI 演变图,可知 17:02 横山西部、北部,神木西部、榆阳区有多个雷暴单体生成,回波中心强度在 50 ~ 60 dBz,对应的垂直累计液态含水量 VIL 达到 35 ~ 40 kg · m⁻²;造成该区域横山白界等 5 站出现短时强降水;随后雷暴单体连为一体呈带状又分裂,18:54,横山白界上空雷暴单体依然维持,神木东部、府谷又出现新的雷暴单体,回波中心强度>50 dBz,VIL 达到30 kg · m⁻²,所对应区域出现 5 站短时强降水,其中白界站 18:00 ~ 19:00 小时降水量达 68.7 mm。随后回波向东南部移动,对应区域出现强降水。29 日 04:00 开始回波逐渐散去,降水趋于减弱消失。

图 11 给出过程 B 中 8 月 3 日不同时次 0.5 °仰角基本反射率因子 PPI 演变图及对性时次的 1.5 °仰角基本速度 PPI 演变图。过程 B 的暴雨,强度大、范围广、持续时间较长,在相应的多普勒速度图上,大尺度辐合辐散特征明显。08:44 的速度图中,50 km 内零速度线弯向正速度区,负速度区的面积大于正速度区,为大尺度辐合运动。16:13,低空从偏东风随高度顺转,零速度线呈 S 状,说明中低层有暖平流与辐合运动结合,此时回波强度 30 ~ 45 dBz,此时横山东南部有逆风区存在,子洲西部也有小块逆风区存在,如图中白圈所示。艾好峁 16:00 ~ 17:00 (22.3 mm)、石湾 (31.3 mm)、魏家楼 (34.5 mm) 三站出现短时强降水,其中石湾日降水量 88.5 mm 魏家楼日降水量达 120.9

mm;17:21,零速度线仍呈 S 状,其中马岔附近回波强度达 45 dBz,17:00 ~ 18:00 降水量达 44.3 mm,日降水量子洲西部逆风区增大,马岔、高家坪、店市三站出现短时强降水,店市 77.6 mm、马岔 139.2 mm、高家坪 101.7 mm。上述表明暖平流加辐合,再叠加逆风区,有利于降水的发展,往往也是暴雨区。23:35 的速度图上可看出,在低层为东南偏南风,30 km 测站西部高度榆林巴拉素镇附近,零等速线出现折角,再向上高度风向为西北偏西风,对比此时该地区回波强度为 45 ~ 55 dBz,综合地面资料 22:00 ~ 23:00、23:00 ~ 00:00、01:00 ~ 02:00 巴拉素小时降水量分别为 34.3 mm、64.5 mm、24.5 mm,位于巴拉素东部的芹河乡 23:00 ~ 00:00、00:00 ~ 01:00、01:00 ~ 02:00 小时降水量分别为 0.9 mm、6.2 mm、25.3 mm,04:00,折角已过测站。综上所述 22:00 ~ 04:00 榆林上空自西向东有冷锋过境,冷锋使南部暖气团被迫沿锋面向上滑行抬升,配合充足的水汽条件,上升的暖湿空气冷却凝结,在锋上产生了强降水。

综上,组合反射率产品 CR 和垂直累计液态含水量产品 VIL 对于对流性暴雨有很好的指示意义,当 CR 回波强度>50 dBz,VIL>30 kg · m⁻²,对应区域会出现短时强降水,如果长时间维持考虑达到暴雨量级。基本反射率因子产品 R19 及基本速度产品 V27 对于以系统性降水为主的混合性降水指示意义比较明显。当负速度面积大于正速度面积,零速度线呈 S 状,回波强度 35 ~ 45 dBz,叠加逆风区有利于大面积强降水形成;当零速度线呈折角,表示有冷锋经过,配合 45 dBz 左右回波强度,冷锋经过地区降水加强,有利于形成暴雨。

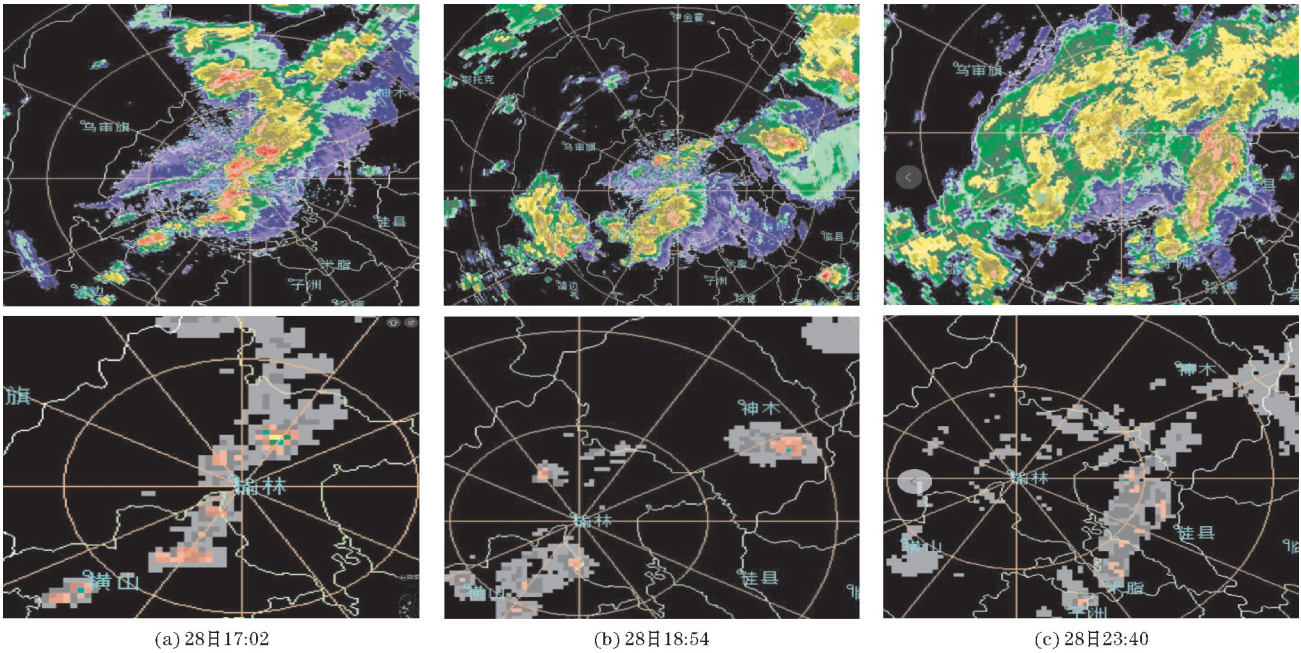


图 10 过程 A 3 个时次的 CR 产品和 VIL 产品

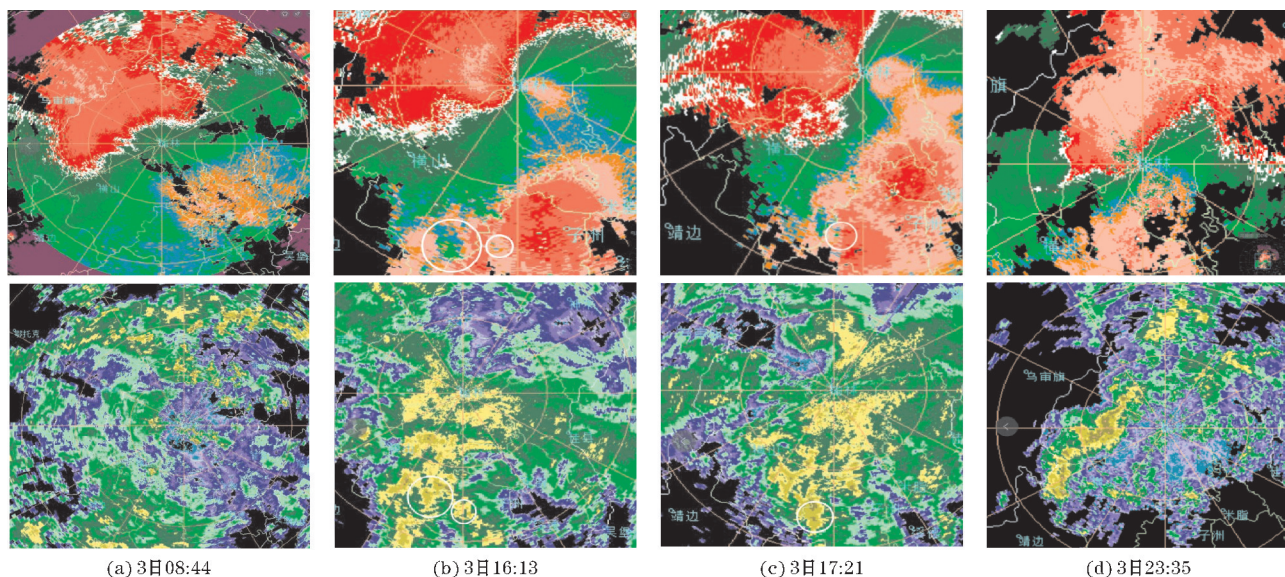


图11 过程B 4个时次的V27产品和R19产品

6 结论

(1)西风槽配合副高外围偏南暖湿气流,近地层切变线、辐合线的生成、发展是造成榆林地区对流性降水的增幅条件。

(2)西风槽配合中低空强的气旋性辐合系统,低层有东路冷空气,且有中国南部台风外围的水汽输送,是造成榆林地区系统性暴雨的有利条件。

(3)中尺度对流系统MBCS的冷云罩和冷云区与对流性暴雨区对应,且对流性暴雨易出现于两个MBCS边缘相互靠近区、TBB等值线梯度大值区;高空槽涡旋状云系中心对应系统性暴雨强降水区。

(4)中层干空气侵入与低层冷垫都有利于降水加强,暴雨易出现于 θ_{se} 陡峭和密集区,在其附近都有垂直上升速度大值区与之对应。

(5)高值位涡柱从500 hPa开始下侵有利于对流性暴雨形成,高值位涡柱从350 hPa开始下侵有利于系统性暴雨形成;700 hPa湿正压与湿斜压的正负值过渡区对应暴雨的落区,对暴雨有指示意义。

(6)CR和VIL对于榆林对流性暴雨有很好的指示意义,当CR回波强度 >50 dBZ, VIL >30 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$,对应区域会出现短时强降水。R19及V27对于以系统性降水为主的混合性降水指示意义比较明显。当负速度面积大于正速度面积,零速度线呈S状,回波强度35~45 dBZ,叠加逆风区有利于大面积强降水形成;当零速度线呈折角,表示有冷锋经过,配合45 dBZ左右回波强度,冷锋经过地区降水加强,有利于形成暴雨。

参考文献:

- [1] 胡启元,李萍云,井宇,等. “17·7”榆林特大暴雨成因及多普勒雷达特征分析[J]. 陕西气象, 2018(2): 10–15.
- [2] 刘勇,杜川利. 黄土高原一次突发性大暴雨过程的诊断分析[J]. 高原气象, 2006, 25(2): 302–308.
- [3] 黄玉霞,王宝鉴,黄武斌,等. 我国西北暴雨的研究进展[J]. 暴雨灾害, 2019, 38(5): 515–525.
- [4] 靳莉君,任伟,周丹丹. 假相当位温在黄河“7.21”雨洪分析中的应用[J]. 人民黄河, 2013, 35(6): 25–26.
- [5] 吴国雄,蔡雅萍,唐晓菁. 湿位涡和倾斜涡度发展[J]. 气象学报, 1995, 53(4): 378–405.
- [6] 李国平,刘行军. 西南低涡暴雨的湿位涡诊断分析[J]. 应用气象学报, 1994, 5(3): 354–360.
- [7] 寿绍文,李耀辉,范可. 暴雨中尺度气旋发展的等熵面位涡分析[J]. 气象学报, 2001, 59(5): 560–567.
- [8] 张迎新,胡欣,张守宝. 位涡在“96.8”特大暴雨过程中的应用分析[J]. 气象科技, 2004, 23(12): 25–28.
- [9] 李静楠,潘晓斌,臧增亮,等. 一次华北暴雨过程的湿位涡诊断分析[J]. 暴雨灾害, 2016, 35(2): 158–165.
- [10] 傅朝,杨晓军,周晓军,等. 2013年6月19–20日甘肃龙东南暖区暴雨多普勒雷达特征分析[J]. 气象, 2015, 41(9): 1095–1103.
- [11] 王清平,彭军,茹仙古丽. 克里木. 新疆巴州“6.

- 4”罕见短时暴雨的 MCS 特征分析[J]. 干旱气象, 2016, 34(4): 685–692.
- [12] 聂云, 周继先, 顾欣, 等. “6. 18”梅雨锋西段黔东南大暴雨个例诊断分析[J]. 暴雨灾害, 2018, 37(5): 445–454.
- [13] 胡凯恒, 葛永刚, 崔鹏, 等. 对甘肃舟曲特大泥石流灾害的初步认识[J]. 山地学报, 2010, 28(6): 628–634.
- [14] 鲁亚斌, 李华宏, 闵颖, 等. 一次云南强对流暴雨的中尺度特征分析[J]. 气象, 2018, 44(5): 645–654.
- [15] Orlanski I. A rational subdivision of scales for atmospheric processes [J]. Bull Am Meteor Soc, 1975, 56: 527–530.
- [16] 杨淑楠, 张芳华, 徐珺, 等. 四川盆地一次暴雨过程的中尺度对流及其环境场特征[J]. 高原气象, 2016, 35(6): 1476–1486.
- [17] 白涛, 李崇银, 王铁, 等. 干侵入对陕西“2008. 07. 21”暴雨过程的影响分析[J]. 高原气象, 2013, 32(2): 2345–2356.
- [18] 赵宇, 杨晓霞, 孙兴池. 影响山东的台风暴雨天气的湿位涡诊断分析[J]. 气象, 2004(4): 15–20.

Analysis of Two Rainstorm Processes in Yulin Area of Shaanxi Province in Summer

LI Shanshan, HOU Keran, LI Xiaoli, KANG Lei

(Meteorological Bureau of Yulin City, Yulin 719000, China)

Abstract: Based on the regular observation data of automatic weather station, MICAPES, $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ NCEP FNL analysis data, FY-2G Infrared cloud, FY-2G TBB data, CB Doppler radar VCP21 data to analyze two rainstorm processes in Yulin (July 28–29, 2019 and August 2–4, 2019). The results show that: (1) When the the subtropical high northwards and westwards, and the cold air brought by the westerly trough intersects in northern of Shaanxi, with the triggering of the near-layer shear line and convergence line, are favorable conditions for convective heavy rain; The westerly trough with low-altitude intensity cyclone convergence system, and the lower cold air from the east area and transportation of the water vapor around the typhoon are favorable conditions of systemic rainstorms; (2) The M β CS, and the center of the vortex cloud system corresponds to heavy rain area; (3) Intrusion of dry air in the middle layer and cold pads in the lower layer are conducive to the strengthening of precipitation. Rainstorms are prone to occur in steep and dense areas; the area is where high value vortex column starts to invade is conducive to the formation of convective heavy rain and systematic rainstorm; the transition zone between the positive and negative values of 700 hPa wet positive pressure and wet baroclinic pressure corresponds to the rainfall area; (4) The value of CR and VIL are better indication for Yulin convection Heavy rain. When the CR echo intensity reaches 50 dBz and the VIL reaches 30, there will be short-term heavy precipitation in the corresponding area. When the negative velocity area is greater than the positive velocity area, the zero velocity line is S-shaped, the echo intensity is 35–45 dBz. and the superimposed upwind zone is conducive to the formation of large areas of heavy precipitation; when the zero velocity line is at an angle, it indicates that a cold front is passing, with 45 dBz of the echoes around, the cold front is strengthened by precipitation in the area, which is conducive to the formation of systemic rainstorms.

Keywords: convective heavy rain; systemic heavy rain; convective instability; wet vortex; zero velocity line; upwind zone