

文章编号:2096-5389(2022)05-0026-07

安顺一次罕见秋季特大暴雨天气分析

曾 妮¹, 方 鹏¹, 何莉阳², 刘思洋¹, 王兴菊¹

(1. 贵州省安顺市气象局, 贵州 安顺 561000; 2. 广西壮族自治区气候中心, 广西 南宁 530000)

摘 要:利用 FNL $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 再分析资料、FY-2F 卫星 TBB 资料及常规气象观测资料, 对 2020 年 9 月 14 日发生在贵州安顺的 1 次罕见秋季暴雨天气过程进行分析。结果表明:副热带高压东退, 引导短波槽东移和低涡切变线南压, 为暴雨的发生提供了有利的天气尺度背景条件; 强水汽辐合中心稳定维持在安顺, 暴雨中心与水汽辐合中心相对应; 暴雨区上空低层暖平流和中层冷平流的叠加, 利于上升运动的发展, 为能量和潜热的释放提供有利条件; 中尺度对流云团在生成阶段发展迅速, 成熟以后减弱缓慢, 并在安顺上空稳定少动, 是导致全市范围出现暴雨到特大暴雨的主要原因, 且暴雨区与 $TBB \leq 55^{\circ}\text{C}$ 的区域对应较好; 在对流云团生成的区域, 其水汽、能量和抬升条件均较好, 在对流云团东移影响的区域, 大气层结不稳定, 湿层深厚, 但能量条件较差, 导致此次暴雨过程的对流性不是很强, 在降水最强时段, 小时雨强大多在 $20 \sim 40 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 之间。

关键词:秋季; 暴雨; TBB; 温度平流

中图分类号:P458.1+21.1 **文献标识码:**A

Analysis of a Rare Autumn Rainstorm in Anshun

ZENG Ni¹, FANG Peng¹, HE Liyang², LIU Siyang¹, WANG Xingju¹

(1. Anshun Meteorological Bureau of Guizhou Province, Anshun 561000, China;

2. Guangxi Zhuang Autonomous Region Climate Center, Nanning 530000, China)

Abstract: Using FNL $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ reanalysis data, FY-2F satellite TBB data and conventional meteorological observation data, the process of a rare autumn rainstorm that occurred in Anshun, Guizhou from September 13 to 14, 2020 was analyzed. The results show that the eastward retreat of subtropical high leads the eastward movement of short-wave trough and the southward pressure of low vortex with shear line, which provides favorable synoptic scale background conditions for the occurrence of heavy rain. The strong water vapor convergence center remained stable in Anshun, and the rainstorm center corresponded to the water vapor convergence center. The superposition of warm advection in the lower layer and cold advection in the middle layer in the rainstorm area is beneficial to the development of ascending motion and provides favorable conditions for the release of energy and latent heat. The mesoscale convective cloud developed rapidly in the generation stage, weakened in intensity and moved slowly after maturity, and moved steadily and rarely over Anshun, which was the main reason for the occurrence of rainstorm to extremely heavy rainstorm in the whole city, and the rainstorm area corresponded well to the area with $TBB \leq 55^{\circ}\text{C}$. On the one hand, the atmospheric water vapor, energy and uplift conditions are good where the convective cloud cluster is generated. On the other hand, in the area affected by the eastward movement of the convective cloud cluster, the atmospheric stratification is unstable and the wet layer is deep, but the energy conditions are poor. Therefore, the convective property of the rainstorm process is not very strong, and the hourly rainfall intensity is mostly between 20 and 40 mm per hour during the period of strongest rainfall.

Key words: autumn; rainstorm; TBB; temperature advection

收稿日期:2021-09-13

第一作者简介:曾妮(1991—),女,工程师,主要从事短期和中期天气预报工作,E-mail:563975946@qq.com。

0 引言

暴雨是我国最常见的灾害性天气之一,常常引起山体滑坡、泥石流和城市内涝等灾害,对人们的生命、财产等造成严重损失。许多气象工作者对暴雨天气的影响系统、环境条件、环流形势等进行分析和研究^[1-5]。赵思雄等^[6]对华北和北京的一次大暴雨过程分析发现,暖(湿)输送带自南向北推进对华北和北京地区的水汽通量辐合至关重要。邓承之等^[7]对一次西南涡特大暴雨过程中 MCS 的演变特征进行分析,发现中低层西南风或南风急流的增强、低空及地面暖湿入流的增强均有利于 MCS 的增强。杜小玲等^[8]分析贵州望谟的一次暴雨天气,发现锋生造成的强降水出现在锋区南侧和暖湿空气北侧的强上升运动区。夏季(6—8月)是贵州暴雨天气过程最为集中的季节,秋季(9—11月)是贵州暴雨天气过程逐渐减少、雨季逐步结束的季节。曾妮等^[9]对安顺市大暴雨的时空分布特征进行分析,发现2009—2019年11a间9月安顺市出现大暴雨的天数仅为5d。2020年9月14日安顺市出现特大暴雨天气过程,其影响范围和累计雨量超过了安顺市秋季暴雨的历史极值。因此,本文利用 FNL $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 再分析资料、FY-2F 卫星 TBB 资料及常规气

象观测资料,对2020年9月14日安顺市暴雨天气过程的成因进行分析,以期为提高安顺地秋季暴雨预报及服务水平提供参考。

1 过程概况

2020年9月13日20时—14日20时(简称14日,下同),安顺市出现全年影响范围最广的暴雨天气,全市除紫云县南部以外,普降暴雨到大暴雨,局地特大暴雨(图1a)。由图看出,此次暴雨天气过程共出现特大暴雨4站、大暴雨54站、暴雨80站,最大累计降水量为紫云县白石岩站的258.7mm。此次暴雨天气过程的影响范围和大暴雨以上量级的降水站次,突破安顺市秋季暴雨的历史极值。

对出现特大暴雨的站点进行逐小时雨量分析(图1b)发现,此次暴雨过程的对流性不是很强,在降水最强的时段(14日01—07时)小时雨强大多在 $20 \sim 40 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 之间,仅有3个时次小时雨强超过 $40 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$,最大小时雨强为镇宁县炳云的 $47.1 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$,14日07时以后以稳定性降水为主。此次暴雨天气过程的短时强降水(小时雨强 $\geq 20 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$)持续时间和稳定性降水持续时间均较长,是造成全市大范围出现暴雨—大暴雨的主要原因。

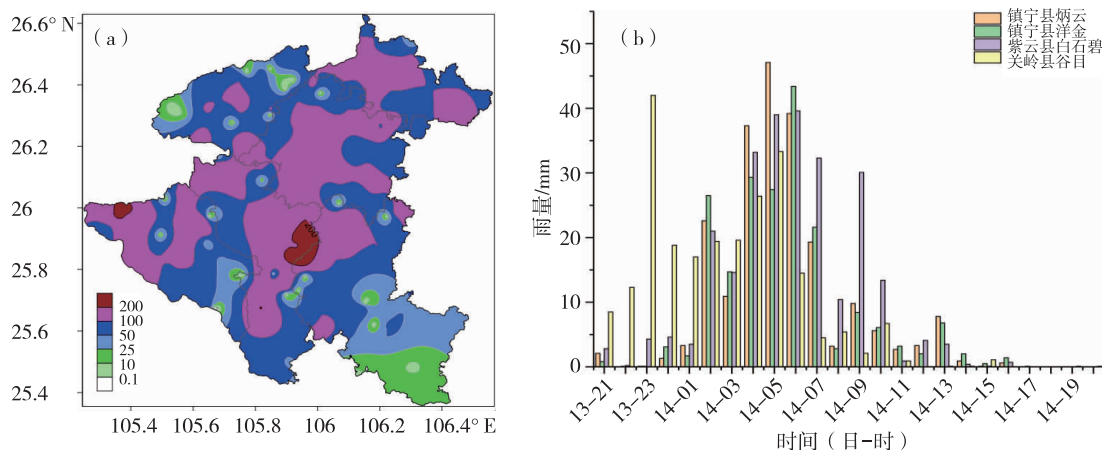


图1 安顺市2020年9月13日20时—14日20时累计降水量(a)、特大暴雨站点逐小时降水量(b)

Fig. 1 The accumulated rainfall (a), hourly rainfall at extreme storm sites

(b) in Anshun from 20:00 on September 13 to 20:00 on September 14, 2020

2 大气环境条件分析

2.1 天气形势

9月13日08时(图2a),200 hPa 贵州处于南亚高压东部脊区,高层辐散的抽吸作用利于低层气流辐合上升;500 hPa 副热带高压脊线位于 25°N 附近,西脊点位于 75°E 附近,南支槽位于四川西部—

云南西部,贵州处于槽前西南气流中;700 hPa 切变线位于陕西南部—四川中北部以及云南西部,贵州受 $4 \sim 6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的偏西气流影响;850 hPa 四川西部低涡切变建立,贵州处于低涡切变南侧的偏南气流中,风速为 $2 \sim 4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。20时(图2b),500 hPa 副热带高压略有西伸,同时南支槽加深,其北段东移到四川东部;700 hPa 原位于陕西南部—四川中北部

的切变线由南北向转为东西向,位于四川北部—重庆北部,西南气流增强到 $8 \sim 12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$;850 hPa 低涡切变稳定维持,偏南气流增加到 $4 \sim 6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。从海平面气压场看出(图略),08 时有弱冷空气从东

北方向渗透影响贵州,17 时冷高压分裂南下,在湖北和湖南的交界处形成 1 个高压中心,冷空气影响强度增强。

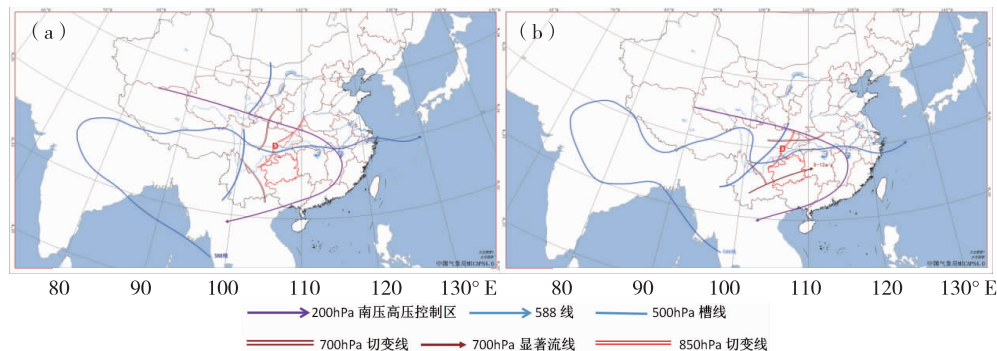


图 2 13 日 08 时(a)和 20 时(b)中尺度环境场
Fig. 2 Mesoscale environmental field at 08:00 (a) and 20:00 (b) on the 13th

从 500 hPa 环流形势演变看出,14 日 02 时之前(图 3a~d)安顺一直在副热带高压的控制范围内,且西南气流较弱。02—08 时(图 3d~e)副热带高压逐渐南压到贵州南部,引导短波槽东移,且西南

气流明显增强,为降水效率的提高提供了有利的降水条件。此期间对流性降水特征最明显,出现特大暴雨的 4 个站点,其短时强降水持续时间为 $3 \sim 6 \text{ h}$ 。

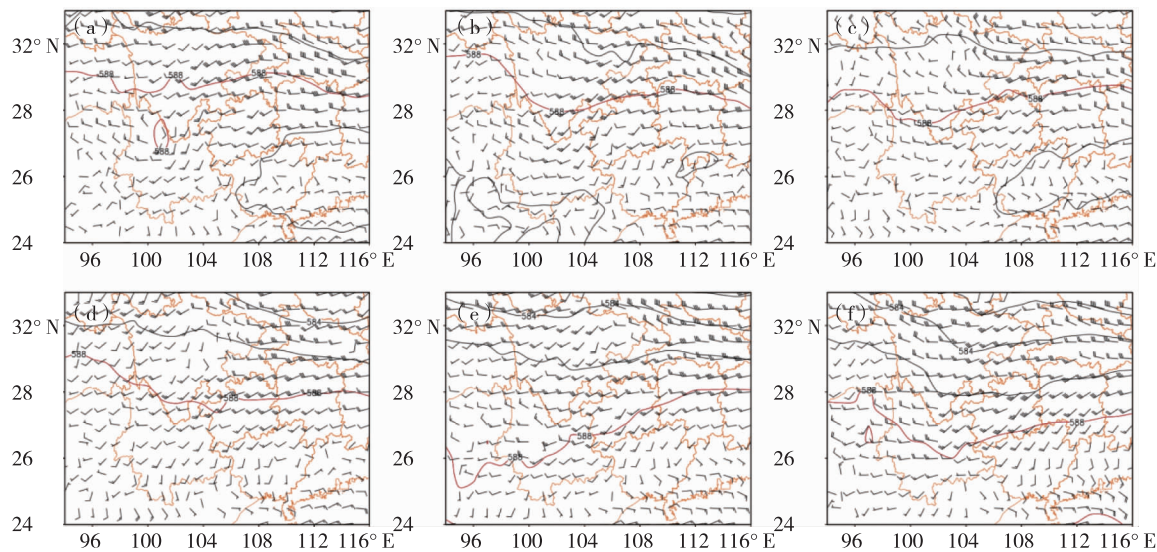


图 3 500 hPa 高度场(单位:dagpm,红线为副热带高压特征线)和风场(单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)变化趋势
(a:13 日 08 时,b:13 日 14 时,c:13 日 20 时,d:14 日 02 时,e:14 日 08 时,f:14 日 14 时)
Fig. 3 The variation trend of geopotential height field (unit:dagpm,the red line is the characteristic line of subtropical high)and wind field (unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)at 500 hPa(a: 08:00 on the 13th, b: 14:00 on the 13th, c: 20:00 on the 13th, d: 02:00 on the 14th, e: 08:00 on the 14th, f: 14:00 on the 14th)

综上所述,此次暴雨天气过程的主要影响系统为高空槽和中低层低涡切变线。在强降水发生前,500 hPa 贵州受副热带高压控制,且处于副热带高压北侧,低层为辐合区,高层为辐散区^[10],利于上升运动发展和能量积累。强降水发生期间副热带高压

快速南压,引导短波槽东移。从 08 时和 20 时的实况看出南风较弱,不利于水汽的输送,但从图 7a 看出,13 日 20 时以后南风逐渐增强,到 14 日 02 时急流建立,为暴雨的产生提供有利的条件。

2.2 环境条件

由于对流云团在云南生成,并东移影响安顺,且安顺位于昆明和贵阳之间,因此对昆明站和贵阳站的 $T-lnp$ 图进行分析。13 日 08 时(图略),昆明站和贵阳站的湿层均从近地面伸展到 200 hPa, $T-T_d \leq 2\text{ }^{\circ}\text{C}$, 大气接近饱和。同时,抬升凝结高度 LCL 较低,在 800 hPa 以下,暖云层较厚,降水效率高,700 hPa 以下风随高度顺转,暖平流明显,利于低层上升运动的发展。13 日 20 时,湿层维持,昆明站从近地面到 500 hPa 转为西南气流影响(图 4a),贵阳站的暖平流较 08 时有所增强,500 hPa 以下 $T-T_d \leq 1\text{ }^{\circ}\text{C}$, 大气的饱和程度增加(图 4b)。

由表 1 可见,2 个时次贵阳站的对流有效位能

CAPE 几乎为 0,但昆明站的对流有效位能 CAPE 从 $1203.3\text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$ 增加到 $1590.1\text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。13 日 20 时与 08 时相比,抬升指数 LI 从负值变为正值,表明爆发对流的可能性增大。沙氏指数 SI 始终小于 $3\text{ }^{\circ}\text{C}$, 利于阵雨的产生^[10]。抬升凝结高度 LCL 降低到 870 hPa 附近,暖云层增厚,有利于降水效率的提高。同时,贵阳站的 K 指数从 $34.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ 增加到 $36.6\text{ }^{\circ}\text{C}$, 达到安顺市出现暴雨时 K 指数的多年同期平均阈值 ($\geq 35\text{ }^{\circ}\text{C}$)^[11]。

综上所述,对流云团生成的区域,其水汽、能量和抬升条件均较好,在对流云团东移影响的区域,大气层结不稳定,湿层深厚,对流层中低层的暖平流使低层暖湿空气辐合抬升,利于降水云团的发展。

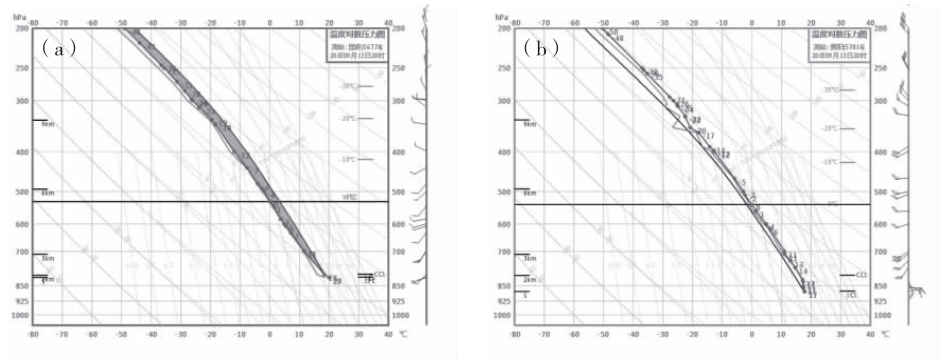


图 4 13 日 20 时 $T-lnp$ 图(a:昆明站,b:贵阳站)

Fig.4 The $T-lnp$ diagram at 20:00 on 13 th(a:Kunming,b:Guiyang)

表 1 昆明站和贵阳站探空物理量值

Tab.1 $T-lnp$ physical values of Kunming and Guiyang

时间	站名	CAPE/ $(\text{J}\cdot\text{kg}^{-1})$	K/ $^{\circ}\text{C}$	SI/ $^{\circ}\text{C}$	LCL/hPa	LI/ $^{\circ}\text{C}$
08 时	昆明	1203.3	-	-0.55	812.0	-3.36
	贵阳	0.4	34.7	-0.08	795.5	-2.95
20 时	昆明	1590.1	-	1.59	875.3	0.8
	贵阳	0	36.6	0.66	874.6	1.98

注:“-”表示无观测值。

3 物理量场分析

3.1 水汽条件

分析强降水发生前后的比湿和水汽通量散度。700 hPa 层上,13 日 08 时,贵州比湿在 $10\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 以上,其中贵州中西部地区的比湿在 $11\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 以上,安顺处于湿舌中(图 5a),20 时大于 $11\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的湿舌范围增大(图 5b),且维持到 14 日 02 时(图 5c),之后湿舌范围逐渐减小,直到 14 日 08 时湿舌范围明显减小,但仍控制安顺市南部(图 5d)。850 hPa 层上,贵州中西部和南部的比湿一直维持在 $13\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 以上,从 13 日 20 时—14 日 08 时安顺一直处于

比湿梯度大值区,且比湿达到 $14\sim 15\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ (图 5e~h)。从 850 hPa 水汽通量散度场看出:13 日 08 时—14 日 08 时强水汽辐合中心稳定维持在安顺(图 6a~d),且 13 日 20 时—14 日 02 时辐合强度增强,其中心值达 $-8\cdot 10^{-5}\text{ g}\cdot\text{hPa}^{-1}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ (图 6b~c)。以上数值均超过安顺市出现暴雨的多年同期平均阈值^[11]。

综上所述,在强降水发生期间安顺处于高湿区中,且强的水汽辐合中心一直稳定维持在安顺,使低空急流输送过来的水汽和本地的水汽在安顺上空辐合,为暴雨的产生提供了充分的水汽供应条件。

3.2 动力和热力条件

从紫云县白岩站的风场、垂直速度和假相当位温的时间—高度剖面图(图 7a)看出,在 13 日 14 时前大气无明显的上升运动,13 日 14 时以后上升运动开始发展并逐渐增强,到 14 日 02 时达到最强。强上升运动从近地面伸展到 200 hPa,且在 700 hPa 和 450 hPa 附近形成 2 个强中心,其中心值达 $-2.1\text{ Pa}\cdot\text{s}^{-1}$,14 日 08 时以后上升运动逐渐减弱。随着上升运动的增强,对流层中、低层的南风也随之增

强,14 日 02 时在 700 hPa 和 850 hPa 有急流建立。假相当位温 θ_{se} 能综合表征大气的湿热能和不稳定度条件。从图中看出不管是强降水发生前后,还是强降水发生期间, θ_{se} 均在 $75\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上,表明降水区处于高能高湿的环境中,且 13 日 14 时—14 日 02 时

高能舌从近地面伸展到 600 hPa 附近且 $\theta_{se}/Z < 0$ 。紫云县白岩站的降水发生在 13 日 21 时—14 日 13 时期间,其中最强降水时段出现在 14 日 02—09 时,与上升运动和南风的增强时段及高能舌的影响时段相对应。

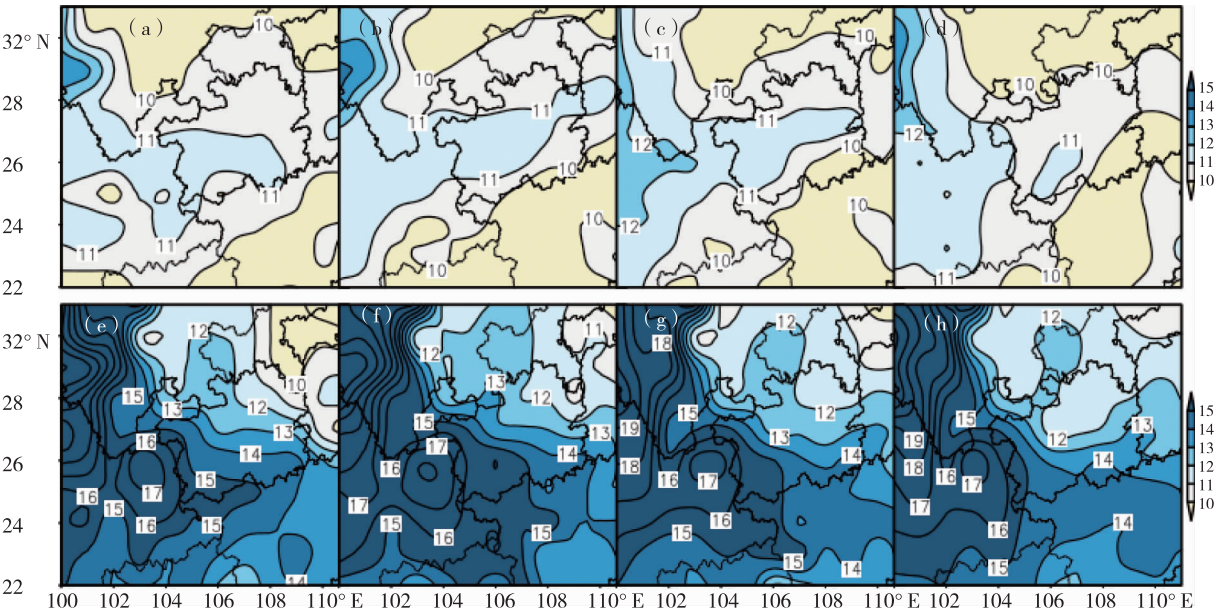


图 5 700 hPa(上)和 850 hPa(下)比湿分布(单位: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)(a,e:13 日 08 时,b,f:13 日 20 时,c,g:14 日 02 时,d,h:14 日 08 时)

Fig. 5 The specific humidity of 700 hPa (top) and 850 hPa (bottom) (unit: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)
(a,e: 08:00 on the 13th; b,f: 20:00 on the 13th; c,g: 02:00 on the 14th; d,h: 08:00 on the 14th)

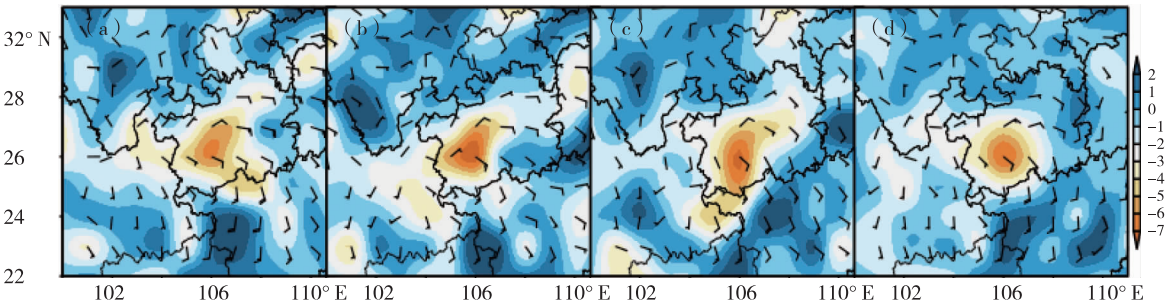


图 6 850 hPa 水汽通量散度(填色,单位: $10^{-5} \text{ g} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)和风场(单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
变化趋势(a:13 日 08 时,b:13 日 20 时,c:14 日 02 时,d:14 日 08 时)

Fig. 6 The variation trend of 850 hPa vapor flux divergence (color filling, unit: $10^{-5} \text{ g} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) and wind field (unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)(a: 08:00 on the 13th, b: 20:00 on the 13th, c: 02:00 on the 14th, d: 08:00 on the 14th)

从 13 日 20 时沿紫云白岩站所作的温度平流纬向(图 7b)和经向(图 7c)剖面看出,暴雨发生前,紫云白岩站上空对流层低层为暖平流,中心位于 800 hPa 附近,其值为 $6 \cdot 10^{-5} \text{ K} \cdot \text{s}^{-1}$,对流层中层为冷平流,在白岩站的东北方向 600 hPa 附近有 $-3 \cdot 10^{-5} \text{ K} \cdot \text{s}^{-1}$ 的冷平流中心;低层暖平流有减压的作用,利于上升运动的发展,中层冷平流的侵入导致未饱和空气趋于饱和,降低了层结稳定度,为能量和潜热的释放提供有利条件,从而增强了上升

运动^[12]。

4 TBB 演变特征

使用 FY-2F 卫星的逐小时 TBB 资料,分析此次暴雨天气过程的中尺度对流云团的演变特征。13 日 19 时,在云南的东南部有 2 个中 β 尺度的对流云团移入贵州西南部,其最低云顶亮温为 $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ (图 8a)。20 时,对流云团迅速发展,TBB 梯度明显增大,在黔西南州中东部和六盘水市西部,其最低云

顶亮温达 -60°C (图 8b); 21—22 时 2 个对流云团合并后向东北方向移动发展, 并进入安顺 (图略)。23 时, 在对流云团的 TBB 梯度大值区处出现短时强降水, 关岭县谷目站小时雨强达 $42\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$, 此时 $\text{TBB}\leq 52^{\circ}\text{C}$ 的冷云区较分散, 主要位于六盘水和黔西南州西部一带 (图 8c)。13 日 23 时—14 日 06 时, 对流云团在贵州西南部发展增强, 影响范围逐渐扩大 (图 8c~f)。14 日 04 时最低云顶亮温达到

-60°C 以下 (图 8e)。06 时对流云团已发展到成熟阶段, 强度达到最强, 安顺大部被 $\text{TBB}\leq 52^{\circ}\text{C}$ 的冷云区覆盖 (图 8f), 由于对流云团移动缓慢, 且强中心位于安顺上空, 使得安顺出现持续时间较长的短时强降水, 因此成为此次强降水天气的暴雨中心。06 时以后对流云团开始减弱, 云体逐渐变得松散, 14 日 17 时云团完全移出安顺 (图 8g~i)。

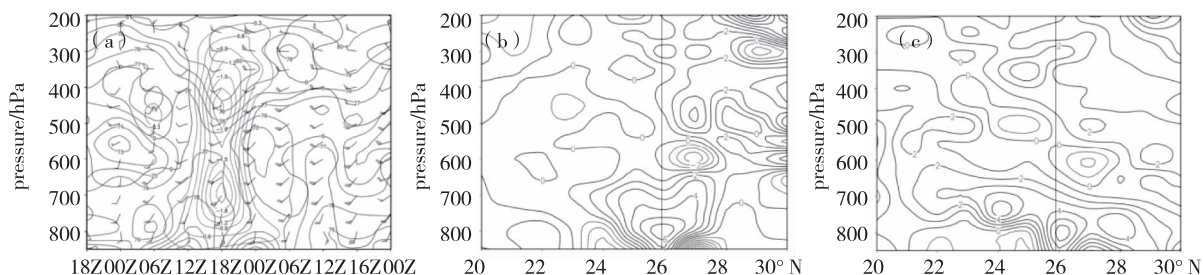


图 7 紫云县白岩站风场 (单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)、垂直速度 (黑色等值线, 单位: $\text{Pa}\cdot\text{s}^{-1}$) 和假相当位温 (红色等值线, 单位: $^{\circ}\text{C}$) 时间—高度剖面 (a)、13 日 20 时沿 25.84°N (b) 和 105.91°N (c) 作紫云白石岩站温度平流 (等值线, 单位: $10^{-5}\text{ K}\cdot\text{s}^{-1}$) 纬向和经向剖面图

Fig. 7 Time-height profiles of wind field (unit: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$), vertical velocity (black isoline, unit: $\text{Pa}\cdot\text{s}^{-1}$) and pseudoequivalent potential temperature (red isoline, unit: $^{\circ}\text{C}$) at Baiyan station, Ziyun County (a), Zonal and meridional profiles of temperature advection (isoline, unit: $10^{-5}\text{ K}\cdot\text{s}^{-1}$) along the Ziyun Baishiyuan station at 25.84°N (b) and 105.91°N (c) at 20:00 on 13th

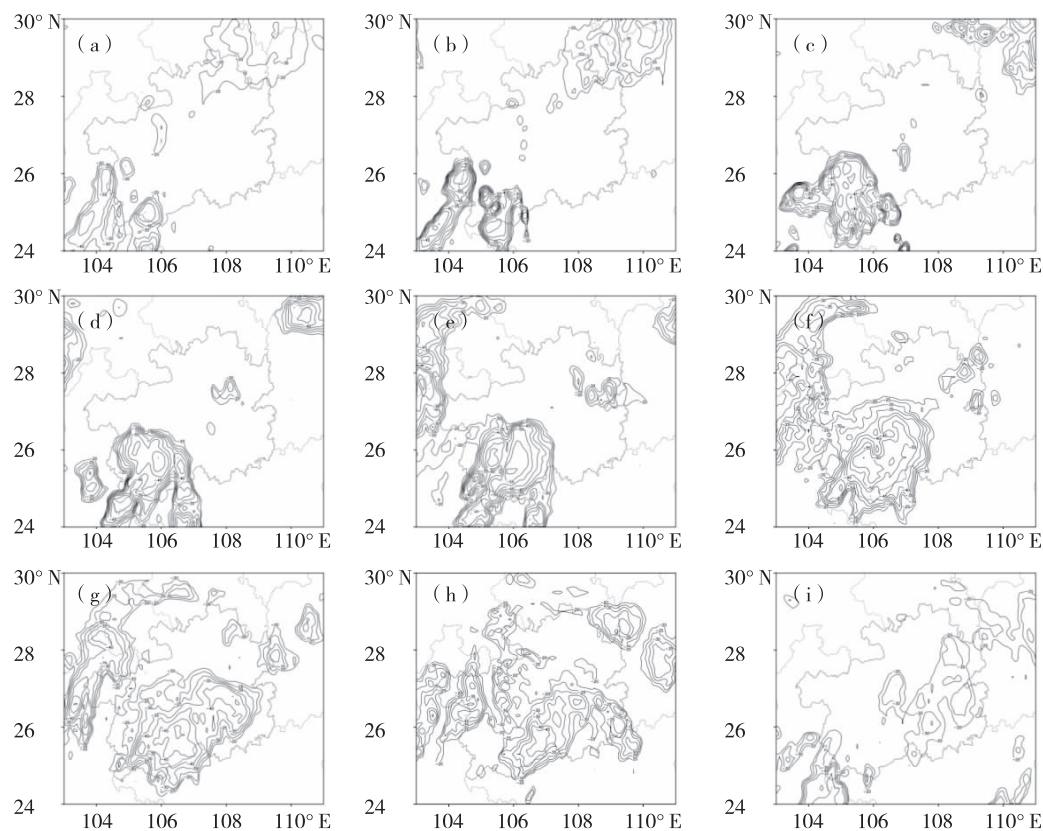


图 8 FY-2F 卫星 TBB (单位: $^{\circ}\text{C}$) 演变 (a: 13 日 19 时, b: 13 日 20 时, c: 13 日 23 时, d: 14 日 02 时, e: 14 日 04 时, f: 14 日 06 时, g: 14 日 09 时, h: 14 日 12 时, i: 14 日 17 时)

Fig. 8 The TBB (unit: $^{\circ}\text{C}$) evolution of FY-2F (a: 19:00 on the 13th, b: 20:00 on the 13th, c: 23:00 on the 13th, d: 02:00 on the 14th, e: 04:00 on the 14th, f: 06:00 on the 14th, g: 09:00 on the 14th, h: 12:00 on the 14th, i: 17:00 on the 14th)

综上所述,此次暴雨过程是由 2 个中 β 尺度的对流云团合并发展成为 1 个中 α 尺度的对流云团,对流云团在生成阶段发展迅速,成熟以后减弱缓慢,生命史约为 22 h,暴雨区与 $TBB \leq 55^\circ\text{C}$ 的区域对应较好。

5 结论

①此次暴雨天气过程的主要影响系统为高空槽和中低层低涡切变线,在强降水发生前,500 hPa 上贵州受副热带高压控制,强降水发生期间副热带高压快速南压,引导短波槽东移,为暴雨的发生提供了有利的天气尺度背景条件。

②暴雨出现前,500 hPa 以下 $T - T_d \leq 1.0^\circ\text{C}$,大气接近饱和,700 hPa 比湿在 $11\text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 以上,850 hPa 比湿在 $14\text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 以上,强水汽辐合中心稳定维持在安顺,且 14 日 02 时低空急流建立,为暴雨的产生提供了充分的水汽条件,暴雨中心与水汽辐合中心相对应;暴雨区低层暖平流有减压的作用,利于上升运动的发展,中层冷平流的侵入导致未饱和和空气趋于饱和,降低了层结稳定度,为能量和潜热的释放提供有利条件。

③强降水的发展与中尺度对流云团的发生、发展和演变有密切的关系,此次暴雨过程由 2 个中 β 尺度的对流云团合并发展成为 1 个中 α 尺度的对流云团,对流云团在生成阶段发展迅速,成熟以后减弱缓慢,生命史约为 22 h,暴雨区与 $TBB \leq 55^\circ\text{C}$ 的区域对应较好,对流云团在安顺上空稳定少动,导致全市范围出现暴雨到特大暴雨。

④对流云团生成的区域,其水汽、能量和抬升

条件均较好,在对流云团东移影响的区域,大气层结不稳定,湿层深厚,但能量条件较差,导致此次暴雨过程的对流性不是很强,在降水最强的时段小时雨强大多在 $20 \sim 40\text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 之间,且仅有 3 个时次小时雨强超过 $40\text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 。

参考文献

- [1] 汪小康,闵爱荣,廖移山. 2018 年 4—10 月我国主要暴雨天气过程简述[J]. 暴雨灾害,2019,38(2):183-192.
- [2] 马梁臣,孙力,王宁. 东北地区典型暴雨个例的水汽输送特征分析[J]. 高原气象,2017,36(4):960-970.
- [3] 官晓东,刘玉,郑凯端,等. 福建一次大暴雨过程的多尺度分析[J]. 气象科技,2018,46(6):1221-1231.
- [4] 周林,乔琪,王君军. 2017 年 6 月 12 日贵阳地区暴雨成因分析[J]. 中低纬山地气象,2018,42(1):48-56.
- [5] 屈梅芳,古文保. 广西一次连续性暴雨过程分析[J]. 气象研究与应用,2016,37(4):41-45.
- [6] 赵思雄,孙建华,鲁蓉,等. “7·20”华北和北京大暴雨过程的分析[J]. 气象,2018,44(3):351-360.
- [7] 邓承之,赵宇,牟容,等. 一次西南涡特大暴雨过程中 MCS 的演变特征[J]. 气象科技,2018,46(1):121-128.
- [8] 杜小玲,杨静,彭芳,等. 贵州望谟初夏暴雨环境场和物理量场合成分析[J]. 高原气象,2013,32(5):1400-1413.
- [9] 曾妮,方鹏,李启芬,等. 安顺市大暴雨的时空分布特征与物理量分析[J]. 中低纬山地气象,2020,44(6):66-70.
- [10] 朱乾根,林锦瑞,寿绍文,等. 天气学原理和方法[M]. 北京:气象出版社,2000:478,442.
- [11] 杨忠明,冯新建,彭波,等. 安顺市两类暴雨模型的建立及应用研究[J]. 贵州气象,2016,40(2):40-44.
- [12] 顾佳佳,武威. 2016 年“7.9”豫北特大暴雨过程的中尺度特征分析[J]. 暴雨灾害,2017,36(5):440-452.