

尤红,肖子牛,王曼,等. 2008 年“7.02”滇中大暴雨的成因诊断与数值模拟[J]. 气象,2010,36(1):7-16.

2008 年“7.02”滇中大暴雨的成因诊断与数值模拟^{*1}

尤 红^{1,2} 肖子牛³ 王 曼⁴ 曹中和¹

1 云南省玉溪市气象局, 玉溪 653100

2 云南大学大气科学系, 昆明 650091

3 国家气候中心, 北京 100081

4 云南省气象科学研究所, 昆明 650034

提 要: 利用常规观测、NCEP $1^\circ \times 1^\circ$ 再分析资料、云图、多普勒雷达回波和 WRF 模式对 2008 年 7 月 2 日滇中大暴雨进行成因诊断和数值模拟。结果表明: 对流层高层的干侵入和中低层冷、暖平流交汇诱发副热带高压和滇缅高压间辐合低涡迅猛发展成强中尺度对流辐合体, 加上中低层来自孟加拉湾的丰富水汽输送和中低层强水汽辐合共同引发此次大暴雨。过程中, 垂直螺旋度贡献主要在中层; 干位涡呈现出对流层顶强正高位涡, 300 hPa 以下为次正高位涡, 两者之间为负区的柱状分布特征, 次正高位涡强中心有向下层延伸特征。WRF 较好地模拟了整个大暴雨过程中强降水主体时段和大暴雨落区特点, 最大对流有效位能变化趋势对强降水有较好预示作用, 模拟方案在积分 30 小时内效果较好。

关键词: 大暴雨, 中尺度对流复合体, 干侵入, 对流有效位能, 数值模拟

Diagnostic Analysis and Mesoscale Numerical Simulation of Extremely Heavy Rainstorm on 2 July 2008 in Middle Yunnan

YOU Hong^{1,2} XIAO Ziniu³ WANG Man⁴ CAO Zhonghe¹

1 Yuxi Meteorological Office of Yunnan, Yuxi 653100

2 Atmospheric Science Department of Yunnan University, Kunming 650091

3 National Climate Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081

4 Yunnan Meteorological Research Institute, Kunming 650034

Abstract: Using the conventional observed data, the NCEP $1^\circ \times 1^\circ$ grid point material, cloud-images and CINRAD-CC Doppler weather radar data, and the mesoscale numerical model WRF, an extremely heavy rainstorm occurring in the middle of Yunnan Province on 2 July 2008 has been diagnosed and simulated. The result shows that the heavy rain is caused by the dry intrusion from the upper troposphere, cold and warm advection confluence in the low middle layer and abundant vapors from the Bay of Bengal. In this extremely heavy rain process, the most effects of vertical helix are in the middle layer, supreme positive potential vorticity (PV) exists on the tropopause, the sub-supreme positive PV is under 300 hPa, and between the two layers present columnar distributing characteristics. Meanwhile, the sub-supreme positive PV can affect its lower layers. The simulated rain and reflectivity distributions by WRF mesoscale numerical model show that the characteristic of rain belt and generant time in Yunnan Province are well reproduced. The change trend of simulated maximum convective available potential energy (CAPE) can well indicate the rain occurrence. The simulation result is better within 30 hours.

Key words: extremely heavy rainstorm, mesoscale convective complex (MCC), dry intrusion, convective available potential energy, numerical simulation

* 本文得到云南省玉溪市气象局课题《WRF 模式在玉溪的应用研究》的支持
2009 年 1 月 17 日收稿; 2009 年 7 月 21 日收修定稿
第一作者: 尤红, 主要从事中短期预报研究. Email: youhyn71@sina.com

引言

暴雨是引发云南洪涝、山体滑坡、泥石流等灾害的重要因子,云南地处低纬高原,地形复杂,具有独特的天气气候特征,每年暴雨及其次生灾害都会给云南造成重大人员伤亡和巨大经济损失,对于经济最发达的滇中地区更为严重。

2008 年 7 月 2 日,云南中部出现历史罕见大暴雨过程,该过程具有暴雨站次多、降水强度大且暴雨

区域和时间集中的明显特点。7 月 2 日云南省分段降水量和昆明自动站雨量分布图上(图 1),大范围暴雨集中出现在 1 日 20:00 至 2 日 08:00(北京时,下同)12 小时中,强降雨带自北减弱南压。大暴雨中心昆明站 24 小时雨量达 122.2 mm,为其建站以来第三大大暴雨。此次突发大暴雨过程引发严重洪涝和城市内涝,造成 1 人死亡,1 人失踪,使国家和人民生命、财产遭受巨大损失,昆明市区严重内涝使部分中考考生无法按时到达中考考场,身心遭受重挫。

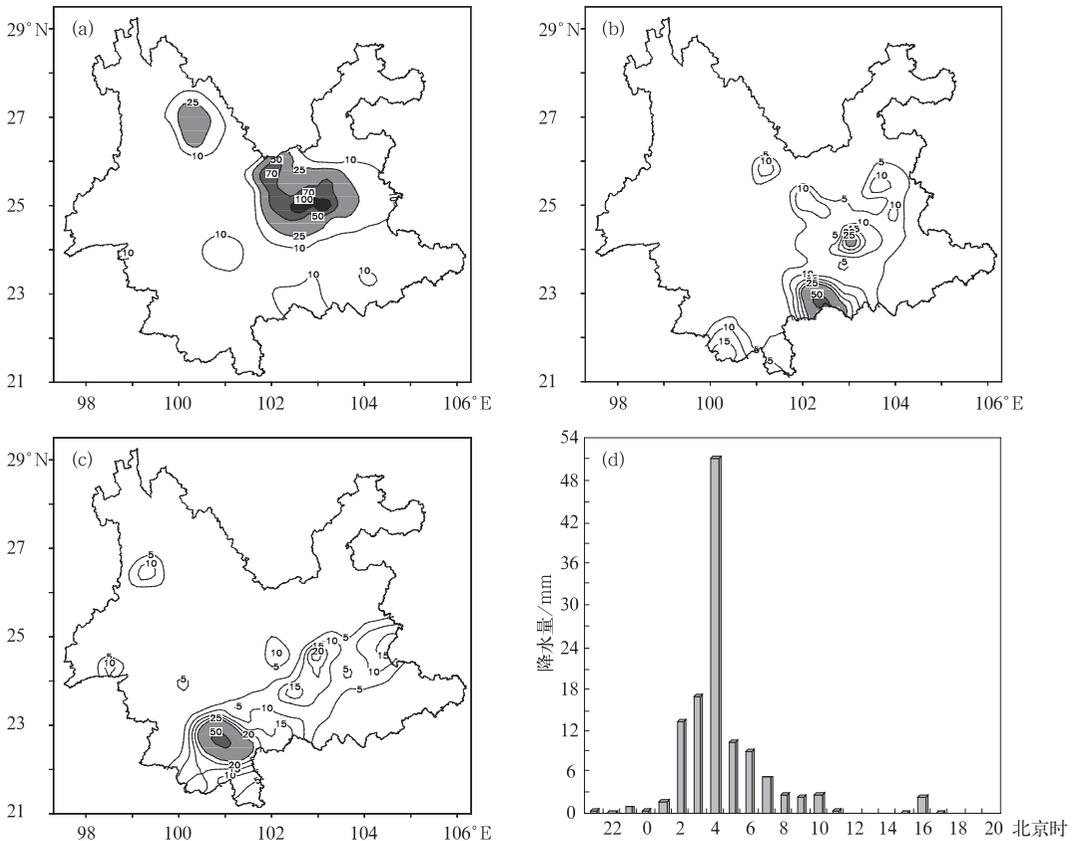


图 1 2008 年 7 月 1 日 20 时至 2 日 08 时(a)、2 日 08—14 时(b)、2 日 14—20 时(c) 降水量和昆明自动站逐时降水量分布图(d)(单位:mm)

Fig. 1 Precipitation distributions (mm) in Yunnan in different periods of (a) 20 BT 1 July—08 BT 2 July, (b) 08 BT 2 July—14 BT 2 July, (c) 14 BT 2 July—20 BT 2 July, and (d) the hourly precipitation of Kunming (mm) at 20 BT 1 July to 20 BT 2 July from the automatic weather station

近年来云南气象工作者针对云南的强暴雨过程进行了各方面的深入研究,如段旭等^[1]和尤红等^[2-3]利用位涡和准地转理论诊断分析了云南几次暴雨过程,晏红明等^[4]和许美玲等^[5-6]用中尺度模式 MM5 分别模拟分析了云南南支槽强降水和两次突发性暴雨的形成机理,揭示了云南暴雨发生、形成的一些机理

和物理量分布特征,丰富、提高了云南预报员对本省暴雨的认识,但利用 WRFV3.0.1 最新版本对云南暴雨的模拟研究未见报导。本研究对“7.02”滇中大暴雨进行成因诊断和数值模拟,探讨其形成的物理机制和 WRF 模式对云南强降水模拟前景,为今后云南暴雨预报和模拟提供一些有益的思路和建议。

1 环流形势特征和影响天气系统

“7.02”滇中大暴雨与大尺度环流形势特征密切相关。大暴雨发生时段环流形势场上(图2):500 hPa中高纬西风槽东南移,其后偏北风向南人侵到四川南部和云南东北部,滇缅高脊增强,云南上空偏北风分量迅速增大转为西北气流控制,副高略减

弱东退,在川南、贵北和云贵交界处形成一“丫”字型辐合低涡区,该辐合低涡正位于副高与滇缅高脊之间,导致其减弱缓慢;700 hPa上川滇切变从西安、遂宁、昭通、九龙、中甸一线略东南移动并缓慢减弱,云南中南部一直为偏西气流控制;地面上全省处于正变压区中,冷空气从滇东北略西南下到滇中东部、西北部一线。可见过程的影响系统是两高间辐合低涡、川滇切变和地面弱冷空气。

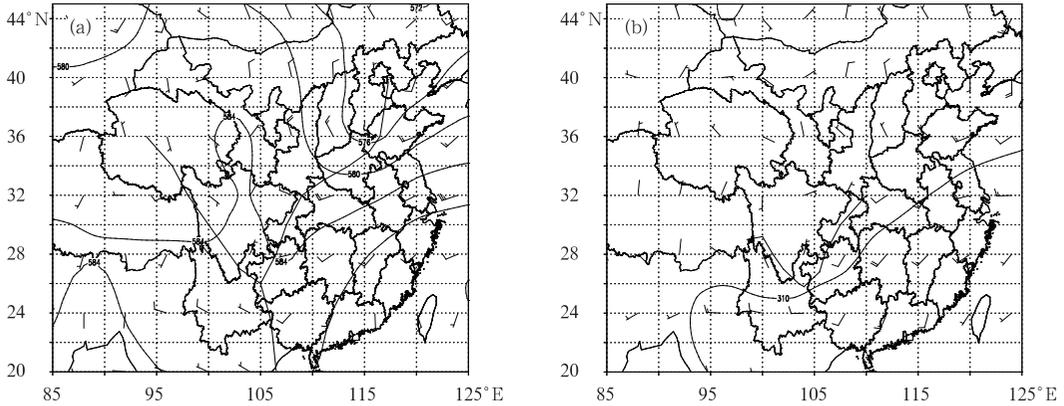


图2 2008年7月1日20:00 500 hPa (a)和700 hPa (b)高度场(dagpm)和风场(单位: $m \cdot s^{-1}$)合成图

Fig.2 The wind ($m \cdot s^{-1}$) and height (dagpm) fields at 20:00 BT 1 July 2008 for (a) 500 hPa and (b) 700 hPa

1.1 云图特征

跟踪“7.02”滇中大暴雨发生前、中、后期的MST1红外云图发现,7月1日08:00—15:00期间造成滇东北大暴雨的MCC明显减弱,青藏高原到孟加拉湾一带出现少云区对应的闭合高压环流,14:00后青藏高原上多小对流云团发生、发展,16:00图3a迅速增强为一条NW—SE向对流云带,向南移动中其前方又有新的中尺度对流系统(MCS)发

生、发展,表明滇缅高脊是个增强过程,7月2日00:00在川南会理到九龙一带上空出现较强的小对流云带,之后到凌晨04:00该小对流云带迅速发展、增强为强中尺度对流复合体(MCC),并快速南压至昆明上空,之后到07:00图3b该MCC对流云团继续南下,08:00后缓慢减弱、分裂南下。该MCC强度变化过程和移动路径和图1中云南强降水分布变化图是一致的,表明大暴雨由该强MCC导致。

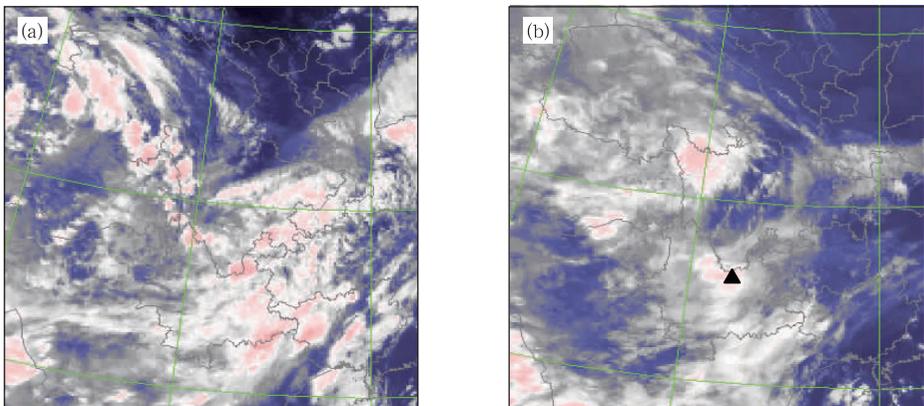


图3 2008年7月1日16:00(a)和2日07:00(b)MST1红外云图

(▲表示滇中大暴雨强中心区位置)

Fig.3 MST1 infrared cloud-images (a) at 16:00 on 1 July 2008, (b) at 07:00 on 2 July 2008.

(▲ is the center of heavy rain).

1.2 雷达回波特征

上述云图变化特征在多普勒雷达回波上有充分体现:7月1日08:00后丽江(海拔3170 m)东北部边缘开始有强度15 dBz的回波发展(图略),之后回波增强向南扩展移动,于午后在丽江东北部形成一NW—SE向强回波带,带中为多个MCS强中心组合的飢线结构,强中心强度达30~40 dBz。该回波带向东南移动并且增强,说明滇西北部局地对流发展是增强趋势。

“7.02”大暴雨期间昆明棋盘山多普勒雷达回波图(图4)上,可以明显看出强 β 中尺度降水回波团自北向南移动趋势。从00:00起滇中北部开始出现

40 dBz强回波团,之后该强雷达回波向南移动、加强;昆明市上空强回波出现在2日凌晨,回波中心强度在40~45 dBz之间,中心强度45~50 dBz的最强回波于03:00—04:00在昆明市区上空少动;06:00后强降水回波团开始减弱南压至玉溪和红河上空。对应昆明自动站降水量(图1)为,01:00—04:00的3小时昆明测站的每小时降水量迅速增强,1小时51.3 mm的最强降水出现在03:00—04:00间,04:00后降水骤减。可见该强 β 中尺度降水回波团与“7.02”滇中大暴雨的强降水出现时间和落区分布特征完全一致,充分显示了此次大暴雨的中尺度特征。

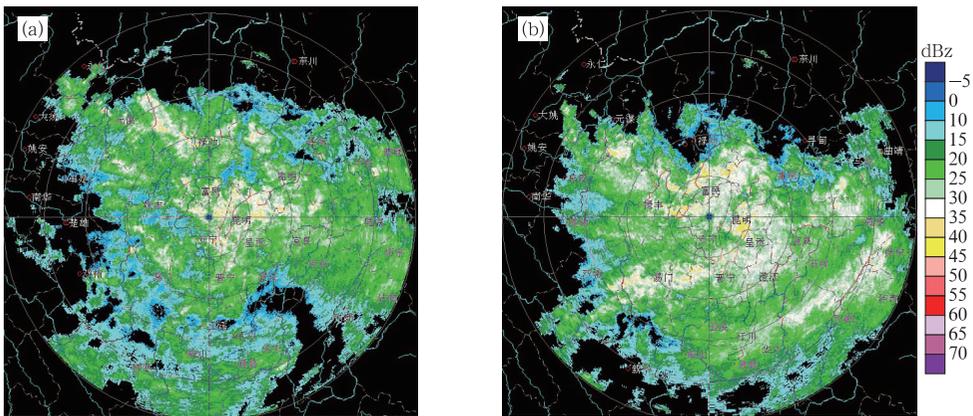


图4 “7.02”大暴雨期间昆明棋盘山CINRAD-CC多普勒雷达回波
扫描方式:VPPI;扫描半径:150 km,仰角:0.5°,天线位置:25°3'7"N、102°34'41"E,海拔高度:2125 m
(a) 2日02:02,(b)2日05:00.

Fig. 4 Kunming Qipanshan Doppler radar VPPI echoes

(a) at 02:02 on 2 July, (b) at 05:00 on 2 July

(elevation: 0.5°, scan radius: 150 km, position: 102°34'41"E, and 2125 m asl)

2 “7.02”滇中大暴雨成因

2.1 温度平流和干侵入特征分析

分析7月1—2日沿25°N的温度平流垂直剖面(图略),暴雨开始前700 hPa以上为强暖平流,在暴雨中心区西部中高层有大于 $5 \times 10^{-5} \text{ K} \cdot \text{s}^{-1}$ 的强暖平流中心,东部有大于 $3 \times 10^{-5} \text{ K} \cdot \text{s}^{-1}$ 的次强中心在低层,此两个暖平流中心下方分别有两个冷平流中心对应,107°E以东地区整层的冷平流对应了500 hPa上西风槽后西北气流和地面冷空气的活动;暴雨发生时,西部近地层的冷平流区加强向东并向高层伸展到600 hPa,同时东部的冷平流在600~500

hPa间迅速向西扩展到103.5°E附近,表明此时有冷、暖平流交汇。西部低层冷平流向东、向高层和东部中层冷平流向西共同对暖平流控制区入侵的时段和侵入点附近分别对应了强降水发生时段和区域;之后该两个冷舌区于2日14:00打通,冷平流侵入使中高层的暖平流迅速减弱,同时低层冷平流增强共同促使地面降水减弱消失。

干侵入在气旋爆发性发展、暴雨增幅、位势不稳定增强和中气旋产生、发展等方面起着重要促进作用^[7-8]。过程中昆明站相对湿度和水平风场的时间剖面(图5)上,对流层高层存在明显干侵入特征:强降水发生前,昆明站小雨天气对应其上空为80%~100%相对湿度大值区;大暴雨期间对流层高层300~200 hPa间出现小于50%的干空气团,其下方的对流层中

低层为湿空气且相对湿度增大,在600~500 hPa间出现饱和湿空气团,水平风场上对流层高层200 hPa至中层500 hPa间盛行偏北风,对流层高层变干、中低层变湿和由从变干区吹向变湿区的偏北风表明存在干侵入;之后中低层开始变干,对流层高层的干空气团迅速变干变大并下移到400~300 hPa间,此时昆明上空整层空气变干,虽然期间对流层高层到中层仍为偏北风,但地面降水停止并出现轻雾天气,即昆明上空对流减弱消失,层结趋于稳定。以上分析表明在“7.02”滇中大暴雨过程中干侵入机制起了重要作用,对流层高层的干冷空气下侵是不稳定能量释放产生强降水的主要触发因素之一。

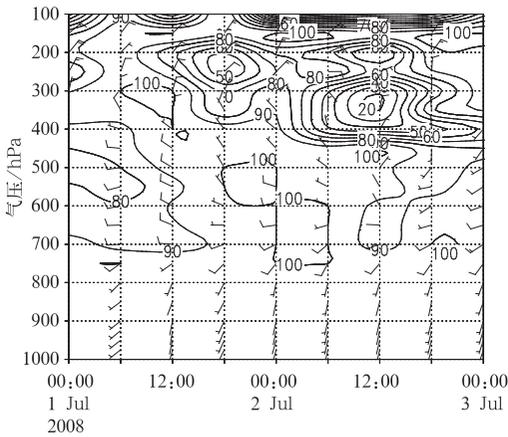


图5 昆明站相对湿度(%)和水平风场($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)高度-时间剖面图

Fig. 5 The time-height cross-section of Kunming relative humidity (unit: %) and wind field (unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)

2.2 位涡特征分析

图6是沿 102.7°E 滇中最强暴雨中心区 $20^{\circ} \sim 32^{\circ}\text{N}$ 区间的1日14:00至2日08:00的干位涡垂直剖面图。暴雨开始前的1日14:00在 $26^{\circ} \sim 28^{\circ}\text{N}$ 间的700 hPa至对流层顶层有柱状强位涡中心出现,对流层顶为 >1.4 PVU的高值区,250 hPa附近有 >1.0 PVU的次强中心,在该强柱状中心的北部和南部分别有 <-0.2 PVU和 <0 PVU的负位涡中心,之后此两个负位涡中心在200 hPa附近分别向南和向北扩展,于2日02:00打通,促使柱状强位涡中心在南移过程中在200 hPa附近被截断,截断线为 $PV=0.2$ PVU,这与云南秋季暴雨中特征一致^[2]。但该位涡小值区和强降水发生区上空位涡的垂直分布还呈现以下新特征:强降水发生区上空,位涡呈现出对流层顶为正高位涡;300 hPa以下层为

0.6~0.9 PVU的次正高位涡,最强降水发生时400 hPa层附近有 $PV>0.8$ PVU的闭合强中心,中心最大值达0.943 PVU;250~150 hPa间为负中心小位涡区。强降水发生和强降水雨带减弱南压时段内,该位涡垂直配置向南移动过程中,中低层次强正位涡不断向低层传送, $PV>0.8$ PVU的闭合强中心下传到700 hPa附近且范围减小;与此同时负中心小位涡区向低层渗透、增强,2日14:00在强降水区上空的250~150 hPa层间为负位涡区,并有强 $PV<-0.2$ PVU闭合中心。在最强降水时段,中低层的次强正位涡中心区范围大小要明显大于其上方的负位涡小值区;当中低层的次强正位涡中心区范围减小,而其上方负区的中心值和范围继续增强时,地面降水减弱;当 PV 零线入侵到300 hPa和位涡小值区控制范围大于低层次强 $PV>0.8$ PVU区时,地面强降水结束。可见此次强降水过程中,150 hPa以下层的位涡有向下层延伸的特征;地面强降水对应的中低层 PV 临界值是0.8 PVU, PV 大于0.8时强降水开始,降水最强时 $PV>0.8$ PVU中心在400 hPa层间。强降水发生区上空,位涡呈现出对流层顶为强正高位涡;300 hPa以下层为次正高位涡,两者之间的250~150 hPa为负中心小位涡区的垂直柱状分布特征。

2.3 垂直螺旋度分析

过程中暴雨中心区 $24^{\circ} \sim 26^{\circ}\text{N}$ 、 $102^{\circ} \sim 104^{\circ}\text{E}$ 平均垂直螺旋度时间垂直剖面图7(a)上,有别于以前研究结果^[9]的是,暴雨区上空“中低层正螺旋度,高层负螺旋度”的经典配置在此次云南罕见暴雨过程中无体现,相反在暴雨发生前200 hPa以下层全是正螺旋度控制区,大于 $6 \times 10^{-6} \text{ hPa} \cdot \text{s}^{-2}$ 的强中心在400~300 hPa间,当该强中心向其下层传送并迅速增大的00:00—05:00期间,450~700 hPa间出现 $8 \times 10^{-6} \sim 11.4 \times 10^{-6} \text{ hPa} \cdot \text{s}^{-2}$ 的强中心,300 hPa以上出现螺旋度负值区,期间昆明自北向南降大暴雨;之后450~700 hPa间强螺旋度减弱并无向下伸展特征,300~200 hPa间有弱正螺旋度出现,相应昆明2日08:00后无降水。此次强降水区上空螺旋度呈现的“高层强正中心向下层的中低层传送并迅速增大,对应地面降水量级增大;当强螺旋度中心不向下伸展且减弱时,地面强降水停止。”特征与文献^[9]中广东龙门特大暴雨的分布有些相似,但此次暴雨过程螺旋度的贡献在对流层中层。

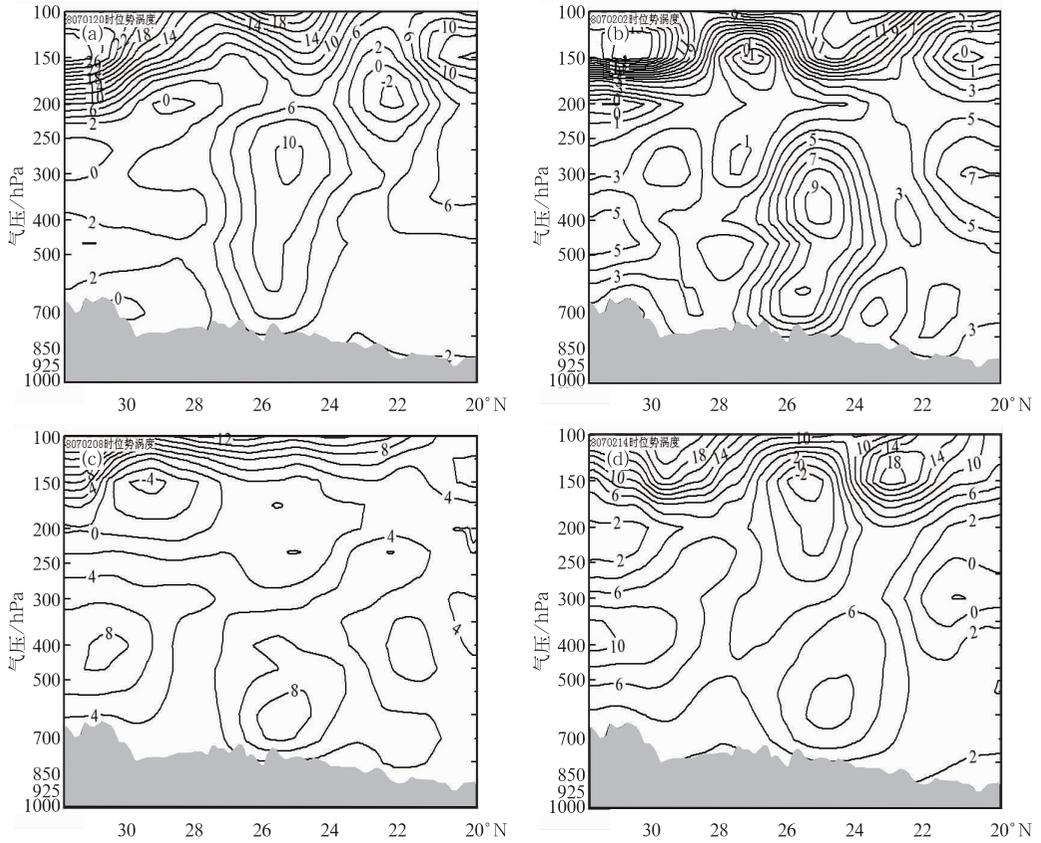


图 6 2008 年 7 月 1 日 20:00—02 日 14:00 每隔 6 小时沿 102.7°E 位势涡度垂直剖面(10⁻¹PVU)

Fig. 6 Vertical cross-sections of PV(unit:10⁻¹PVU) from 20:00 on 1 to 14:00 on 2 July 2008 every 6 hours along 102.7°E

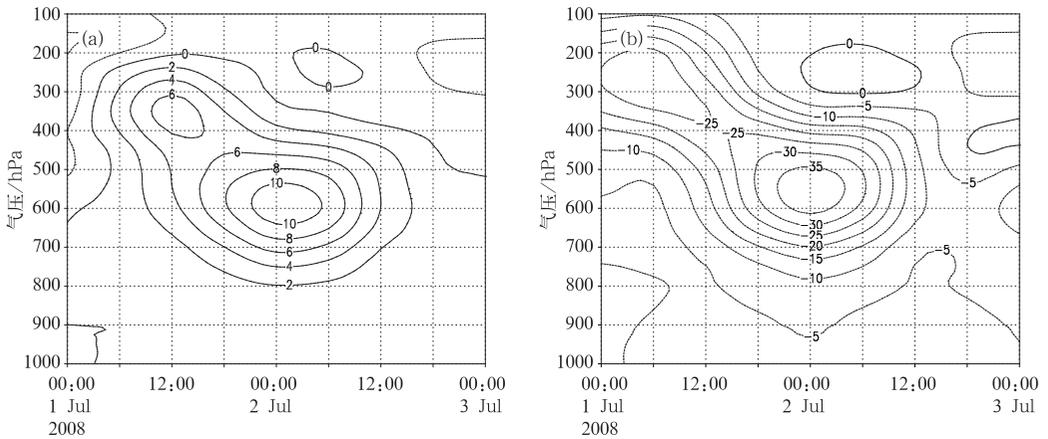


图 7 2008 年 7 月 2 日滇中特大暴雨区(24°~26°N,102°~104°E)的平均垂直螺旋度 (a,10⁻⁶ hPa · s⁻²)和平均垂直上升速度(b,10⁻² hPa · s⁻¹)时间垂直剖面

Fig. 7 The time-height cross-section in the extremely heavy rain area (24°~26°N,102°~104°E) on 2 July 2008, (a)average vertical helix (10⁻⁶ hPa · s⁻²) on 2 July 2008, (b) average vertical velocity (10⁻² hPa · s⁻¹)

以上螺旋度分布和垂直速度场密切相关,图 7b 中强降水发生前,虽整层为上升运动区,但强上升中

心在高层,300 hPa 以下是风速辐散,地面为小雨天气;地面强降水时段中,高层的强上升中心向中低层

移动并于 2 日 04:00 增强,在 550 hPa 处达到最强值($-38 \times 10^{-2} \text{ hPa} \cdot \text{s}^{-1}$),强上升运动所在位置说明过程的主要影响系统是 500 hPa 上的两高间辐合低涡;之后 600~500 hPa 间的上升运动迅速减弱且不再向下层伸展,相应地面降水减弱消失。

2.4 水汽条件

充沛水汽供应是暴雨发生的必要条件。暴雨中心区域平均水汽通量散度时间垂直剖面图 8a 上,7 月 1 日小雨时近地层和对流层中层为弱水汽辐合,两者中间有弱水汽辐散;1 日 14:00 后 550 hPa 以下层水汽辐合量级猛增,在最强降水发生时段内,800~600 hPa 层间出现了水汽通量值小于 $-18 \times 10^{-6} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 的强中心,700 hPa 层上的水汽通量散度值 7 小时内增大 3 倍,500 hPa 以

上层由弱辐合转为辐散且量级也迅速增大了 3 倍,最强水汽辐合在 600 hPa 到近地层,即来自低层的水汽和低层强水汽辐合上升是暴雨发生的重要水汽源地和输送者;随后低层的水汽辐合迅速减弱消失于傍晚转为水汽辐散,水汽输送减弱中断致使地面的降水减弱停止。对应水汽通量主要贡献在 800~600 hPa 层间,过程中在对流层低层的孟加拉湾北部洋面有 $14 \sim 22 \text{ g} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1}$ 大水汽通量区对应,丰沛的水汽由西南风传送到中南半岛西北部后再经由偏西风到达云南,使得暴雨发生区的低层水汽通量在 $6 \sim 12 \text{ g} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1}$ 之间(见图 8b);500 hPa 上通过滇缅高压外围气流向云南输送的水汽通道清晰。表明过程的水汽源地是孟加拉湾。

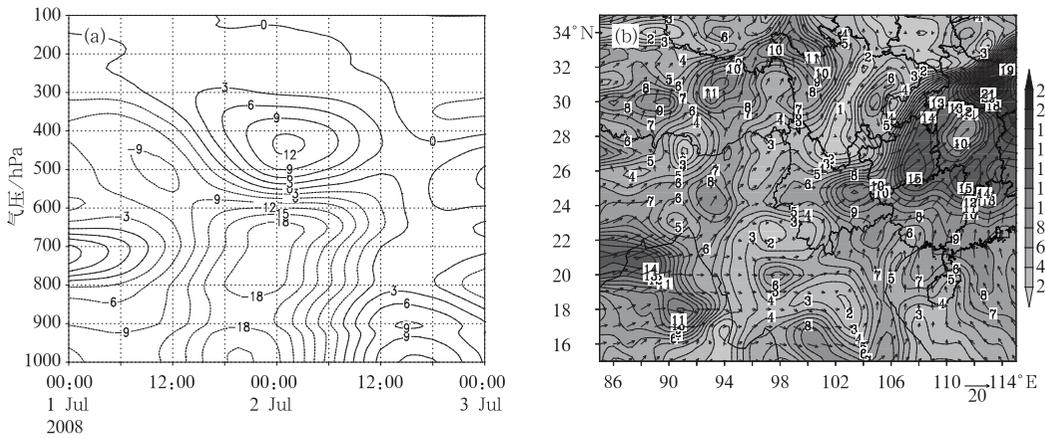


图 8 2008 年 7 月 2 日滇中特大暴雨区域($24^{\circ} \sim 26^{\circ} \text{N}, 102^{\circ} \sim 104^{\circ} \text{E}$)的平均水汽通量散度(a, 单位: $10^{-8} \text{ g} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1}$)和 2 日 02:00 时 700 hPa 水汽通量(b, 单位: $\text{g} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1}$)

Fig. 8 The time-height cross-section of average vapour flux divergence (a) ($10^{-8} \text{ g} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1}$) in the extremely heavy rain area ($24^{\circ} \sim 26^{\circ} \text{N}, 102^{\circ} \sim 104^{\circ} \text{E}$), and the vapour flux on 700 hPa (b), (b, $\text{g} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1}$) at 02:00 on 2 July 2008

3 数值模拟和分析

3.1 模拟方案设计

2008 年“7.02”滇中大暴雨模拟用美国高分辨率中尺度 WRF 模式最新释放的 WRFV3.0.1 版本,采用了三重双向嵌套方案,第一重嵌套分辨率 90 km,格点数 70×60 ,覆盖 $5^{\circ} \sim 50^{\circ} \text{N}, 60^{\circ} \sim 140^{\circ} \text{E}$ 范围包括亚洲大陆及其以南洋面在内的大部地区;第二重分辨率 30 km,格点数 61×61 ,覆盖 $18^{\circ} \sim 33^{\circ} \text{N}, 94^{\circ} \sim 114^{\circ} \text{E}$ 地区;第三重分辨率 10 km,格点数 97×97 ,覆盖 $20^{\circ} \sim 30^{\circ} \text{N}, 97^{\circ} \sim 107^{\circ} \text{E}$ 的“7.02”滇

中大暴雨主降水区。三重嵌套选取的微物理过程和积云参数化方案分别为:第一重嵌套区域采用的是 Thompson 微物理过程方案, Betts-Willer-Janjic 积云参数化方案;第二重嵌套区域采用的是 Thompson 微物理过程方案, Kain-Fritsch (new Eta) 积云参数化方案;第三重嵌套区域采用的是 WSN 6-class graupel 微物理过程方案, Grell-Devenyi ensemble 积云参数化方案。其余的辐射、近地面和边界层均是采用: RRTM 长波辐射方案, Dudhia 短波辐射方案, Monin-Obukhov 地面层物理过程方案, Thermal diffusion 陆面参数过程和 YSU 边界层方案。初始场是 NCEP $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 再分析资料,起始时间

2008年7月1日08时,积分48小时。使用RIP和ARW_{post}软件对模式输出资料进行后处理,生成对此次滇中大暴雨成因进行检验的降水、雷达反射率因子和最大对流有效位能等诊断量产品,以检验WRF模式对该过程的模拟和预警能力。

3.2 降水模拟结果分析

降水模拟结果检验是评估中尺度WRF模式对此次滇中大暴雨模拟和预警能力的最好手段。图9是第三重嵌套的降水模拟图,对比降水实况图1可见,模拟的降水与实况总体分布的特征和移动方向基本上是一致的,反映出大暴雨强降水主体出现时段和落区特点。但模拟结果与实况在落区和强度上稍有些偏差:在最强降水时段中,实况在昆明市和与

其相邻的周边地区出现113.2 mm为强中心的 β 中尺度强降水雨团,丽江有33.7 mm的次强小中心,而模拟结果中昆明市中东部有100 mm以上的强中心,该强中心位置与实况基本吻合,但落区明显小于实况,基本是实况的一半,丽江的次强中心位置偏东至华坪上空,相应在滇西、玉溪西南部和红河出现了较多的小次强降水中心;强降水带减弱南压期间,数值模拟的每6小时降水结果虽然明显反映出了雨带南压和减弱的分布特征,但是模拟的降水强度和强降水区域远小于实况,红河、普洱依次出现的50 mm以上的强降水中心均没有模拟出来,特别是2日14:00后的6小时模拟降水误差最大。可见该方案在积分30小时内的降水模拟效果较好。

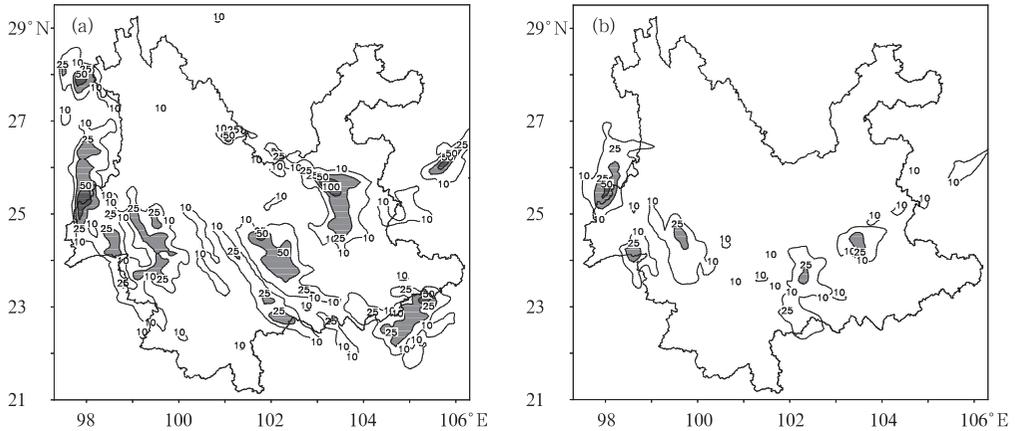


图9 第三重嵌套模拟的分段降水分布图(mm)

(a) 2008年7月1日20:00至2日08:00,(b) 2日08:00至14:00

Fig. 9 Simulated precipitation distribution (mm)

(a) from 20:00 on 1 to 08:00 on 2 July 2008, (b) from 08:00 to 14:00 on 2 July 2008

3.3 雷达反射率模拟结果分析

雷达反射率因子结果强弱、形态和移动趋势是判断强对流种类和降水量级的重要依据。第三重嵌套最强雷达反射率图(图10)上,7月1日午后滇西北丽江上空不断有30~40 dBz的强回波生成、发展并向南移动,而昆明、曲靖和昭通为10~25 dBz弱降水回波区;1日23:00在昆明、曲靖上空出现一个中心强度达到50 dBz强 β 中尺度回波团,之后3小时内该强回波强度和范围均增强,于2日02:00在强回波团中出现由多个大于40 dBz强中心组成的小珠状NE—SW向强回波带,随后在其继续增强南移过程中,小珠状强中心于05:00在昆明上空合并

成中心大于45 dBz强MCC,之后该强MCC迅速减弱、分裂和南移,到2日11:00到达玉溪、红河上空。此期间昆明降水变化是00:00—05:00量级和强度迅猛增大,05:00—10:00减小,11:00后停止。可见模拟的最强雷达回波反射率结果能很好地反映出地面降水强度变化和雨带南压特征。但与实况(图4)对比可见,模拟的 β 中尺度强回波位置略偏东,强降水时段滇中的西部和西南部有较多的小强回波;2日08:00后 β 中尺度强回波团减弱和南移速度比实况快,致使模拟降水较实况减弱更快,云南南部较强降水没有模拟出来。雷达回波反射率结果反映了过程中强降水主体出现时段和落区特点,但与实况在落区和强度上仍有一定偏差。

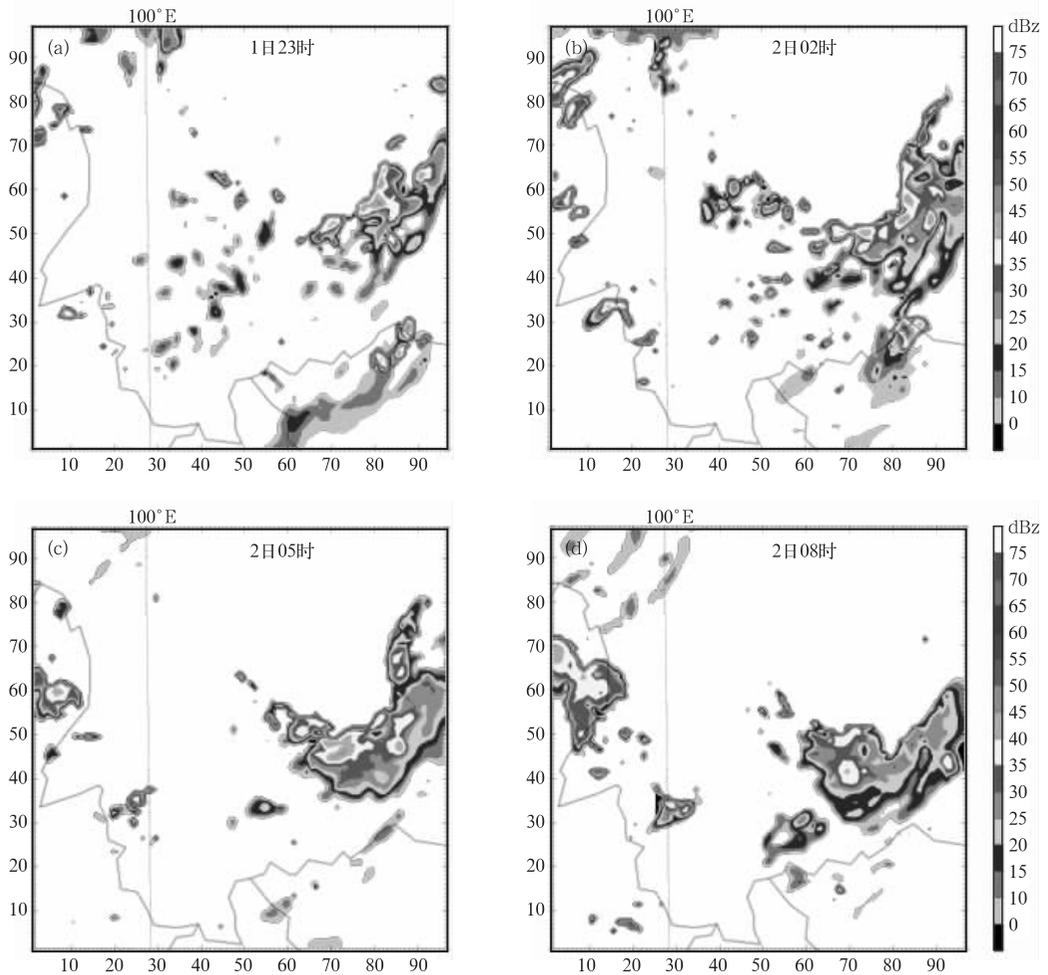


图 10 第三重嵌套模拟的雷达反射率图(dBz)

(a) 7月1日23:00, (b) 7月2日02:00, (c) 7月2日05:00, (d) 7月2日08:00

Fig. 10 Simulated radar reflectivity distributions (dBz)

(a) at 23:00 on 1 July 2008, (b) at 02:00 on 2 July 2008, (c) at 05:00 on 2 July 2008, (d) at 08:00 on 2 July 2008

3.4 最大对流有效低效位能模拟结果分析

对流有效位能(CAPE)是一个与环境联系最为密切的热力学变量,它对强对流天气的发生有较好的指示作用,是近年来国内外研究、诊断强对流过程能量变化最有效、最为常用的物理量之一^[10-11],分析第三重嵌套模拟最大CAPE结果(图略)和单站时间变化(图11),可见暴雨过程中最大CAPE有强烈释放特征:强的最大CAPE释放首先于7月1日20:00—23:00期间在四川凉山州上空,其下属会理的最大CAPE3小时内释放了一半,实际上在川南部生成强对流云团,表明强最大CAPE释放是强对流云团生成的重要机制之一;随后强最大CAPE释放带经过滇中强暴雨区向南移动,暴雨强中心昆明的最大CAPE的变化为先增强再迅速减弱趋势。

地面强降水期间昆明站每隔3小时的最大CAPE值分别为 $200 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $240 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $60 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $25 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$,可见最强的最大CAPE释放是在2日02:00至2日05:00间,3小时的最大CAPE减少了四分之三,巨大能量释放致使昆明站出现过程中的03:00—04:00 1小时最大降水量51.3 mm,随后最大CAPE继续减小但幅度较小,昆明降水迅速减弱消失。过程中其余出现强降水的禄丰、澄江、绿春等站点在强降水发生前后也对应最大CAPE释过程。说明此次强降水WRF数值模拟的最大CAPE减小趋势和强能量释放带移动方向的分布特征的结果能较好地预示出强降水和强对流的发生、发展和移向,其中单站最大CAPE的变化特征预示降水未来变化特征和实况分布是一致的。

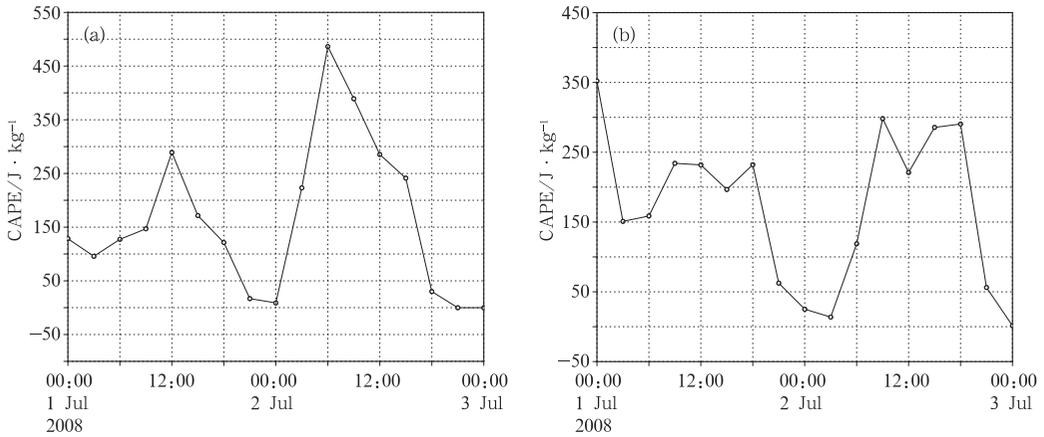


图 11 第三重嵌套模拟的会理(a)和昆明站(b)的最大对流有效位能时间变化图($J \cdot kg^{-1}$)
Fig. 11 Temporal evolution of simulated maximum convective available potential energy (CAPE) at (a) Huili, (b) Kunming ($J \cdot kg^{-1}$)

4 结语

通过对 2008 年“7.02”滇中大暴雨成因诊断和检验分析 WRF 数值模拟输出的降水和雷达反射率因子等结果,得出以下几点结论:

(1) 此次历史罕见的滇中大暴雨的直接影响系统是副热带高压和滇缅高压间的两高间辐合低涡。对流层高层的干侵入和中低层冷、暖平流交汇直接诱发辐合低涡迅猛发展、生成强 β 中尺度的 MCC 导致强降水。

(2) 强降水过程中,位涡呈现出对流层顶为强正高位涡;300 hPa 以下层为次正高位涡,两者之间的 250~150 hPa 为负小位涡区的垂直分布特征。150 hPa 以下层的位涡有向下层延伸的特征,降水最强时 $PV > 0.8$ PVU 中心在 400 hPa。当中低层的次强正位涡中心区范围减小,而其上方负区的中心值和范围继续增强时,地面降水减弱;当 PV 零线入侵到 300 hPa 和位涡小值区控制范围大于低层次强 $PV > 0.8$ PVU 区时,地面强降水结束。

(3) 大暴雨过程中垂直螺旋度的贡献主要在中层,螺旋度呈现的“高层强正中心向其下层的低中层传送并迅速增大,对应此地面降水量级增大;当强螺旋度中心不向下伸展且其值减弱时,地面强降水停止。”的明显特征。

(4) 暴雨过程中,孟加拉湾北部洋面对流层中低层的丰富水汽,源源不断地输送到云南省上空,到达云南的低层的充足水汽经由 600 hPa 到近地层最强的水汽辐合抬升、凝结为强降水过程提供了充足的水汽。即孟加拉湾是水汽源地而低层强水汽辐合是水汽输送者。

(5) 本文 WRF 数值模拟方案所得出的模拟降

水和雷达反射率结果与实况对比,模拟与实况总体分布特征和移动方向基本一致,反映出此次大暴雨过程强降水主体出现时段和落区特点,但模拟结果与实况在落区和强度上仍有些偏差,模拟方案在积分 30 小时内的模拟效果较好。

(6) 此次强降水 WRF 数值模拟的最大 CAPE 分布特征能较好地预示出强降水和强对流的发生、发展和移向,其中单站最大 CAPE 随时间的变化特征预示出的降水未来变化特征和实况分布较为吻合。

参考文献

- [1] 段旭,李英.滇中暴雨的湿位涡诊断[J].高原气象,2000,19(2):253-259.
- [2] 尤红,曹中和.2004 年云南秋季强降水位涡诊断分析[J].气象,2006,32(7):95-101.
- [3] 尤红,周波.准地转理论在低纬高原冬季暴雨中的应用[J].气象,2005,31(11):61-64.
- [4] 晏红明,肖子牛,张小玲,等.低纬高原地区南支槽降水中尺度 MCS 系统的数值与分析[J].高原气象,2005,24(5):672-684.
- [5] 许美玲,段旭,张腾飞,等.低纬高原地区一次罕见大暴雨的中尺度数值模拟[J].高原气象,2006,25(2):268-276.
- [6] 许美玲,段旭,施晓辉,等.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,2003,23(1):84-91.
- [7] 于玉斌,姚秀萍.干侵入的研究及其应用进展[J].气象学报,2003,61(6):669-778.
- [8] 杨贵名,毛冬艳,姚秀萍.“强降水和黄海气旋”中的干侵入分析[J].高原气象,2006,25(1):16-28.
- [9] 尤红,姜丽萍,彭端等.广东“05.6”特大暴雨垂直螺旋度分析[J].气象,2007,33(4):71-76.
- [10] 陈艳,寿绍文,宿海良.CAPE 等环境参数在华北罕见秋季大暴雨中的应用[J].气象,2005,31(10):56-60.
- [11] 刘玉玲.对流参数在强对流天气潜势预测中的作用[J].气象科技,2003,31(3):147-151.