

马红,曾厅余,刘少荣,等.滇东北 2010 年 7 月三次局地暴雨过程诊断分析[J].暴雨灾害,2011,30(1):51-56

滇东北 2010 年 7 月三次局地暴雨过程诊断分析

马红^{1,2},曾厅余¹,刘少荣¹,郑洪¹,叶木林³

(1.云南省昭通市气象局,昭通 657000;2.云南大学大气科学系,昆明 650091;3.湖北省鄂州市气象局,鄂州 436000)

摘要:利用常规观测资料、加密自动站资料和多普勒天气雷达资料,对滇东北 2010 年 7 月接连发生的三次局地暴雨过程进行诊断分析。结果表明:三次暴雨过程均发生在西太平洋副热带高压边缘,其环流背景分别为两高辐合型、低涡切变型和东风波型;天气尺度辐合上升运动和低层不稳定能量释放产生的小尺度上升运动协同是三次局地暴雨发生的原因;三次暴雨均由 SW—NE 向短带对流回波单体产生,强回波带西南端降水强度最大;径向速度图上出现逆风区、低空急流、冷暖平流以及低层中尺度辐合线,逆风区与暴雨落区对应较好,逆风区向上伸展高度与降水强度相对应,逆风区的出现比暴雨出现有 1 h 的提前期,对暴雨短时预报具有重要指示意义。

关键词:局地暴雨;逆风区;低空急流;滇东北

中图分类号:P458.1*21.1 文献标识码:A 文章编号:1004-9045(2011)01-0051-06

Diagnostic Analysis of Three Local Rainstorm Events Over the Northeast of Yunnan Province in July 2010

MA Hong^{1,2}, ZENG Tingyu², LIU Shaorong², ZHENG Hong², YE Mulin³

(1.Zhaotong Meteorological Office of Yunnan Province, Zhaotong 657000;

2.Department of Atmospheric Science, Yunnan University, Kunming 650091;

3.Ezhou Meteorological Office of Hubei Province, Ezhou 436000)

Abstract: A diagnostic analysis of the three local rainstorm events occurred continuously in the northeast of Yunnan Province in July 2010 was performed with the routine observation data, intensive automatic weather station data and Doppler weather radar data. The results indicate that all of the three rainfall events originated in edge of western Pacific subtropical high, and they occurred against the circulation background of two high convergence type, low-vortex and shear-line type and easterly-wave type respectively. The synergetic effect of synoptic scale convergent with ascending motion and micro-scale convergent with ascending motion caused by the release of unstable energy at low level brought about the three local rainstorm events. In base reflectivity picture, the local rainstorms were caused by single-cell of convective echo on short band in SW-NE direction, and the precipitation intensity at the southwest end of the strong echo is the highest. The anti-wind region, low level jet (LLJ), cold (warm) advection and mesoscale convergence line at low level could be found in the radial velocity diagram. The anti-wind region corresponded to precipitation area, and upward extending altitude of anti-wind region corresponded to the precipitation intensity. The emergence time of anti-wind region was one hour ahead of the beginning time of heavy rainfall, and this is an important indication for the short-time forecast of rainstorm.

Key words: Local rainstorm; Anti-wind region; Low level jet; Northeast of Yunnan Province

1 引言

局地暴雨具有范围小、时间短、突发性强特点,易导致山洪、滑坡、泥石流等次生灾害,尤其在地形复杂的山区造成灾害更严重。对于局地暴雨,我国气象工作者从环流背景、影响系统及成因、触发维持机制、雷

达回波特征等方面开展了广泛而深入研究。郭虎等^[1]针对 2004 年 7 月 10 日北京局地暴雨天气,利用雷达、自动气象站、常规气象站资料等,结合天气学分析和重力波指数分析方法,对暴雨的触发机制和落区进行了研究。祁东平等^[2]对一次局地强降水过程的中尺度特征及预报难点分析表明,地面中尺度辐合线、中

收稿日期:2010-09-08;修订日期:2011-01-11

资助项目:云南省气象局课题“雷达产品在局地强对流天气临近预报中的应用”项目(YB201108)

第一作者:马红,女,1969年生,高级工程师,主要从事中短期天气预报工作。E-mail: mahong69@126.com

尺度对流云团是造成强降水的重要中尺度系统;低层偏南到高层偏北风的转变所形成的垂直风切变为强降水发生提供了动力条件,中低层暖湿平流加强为强对流云团稳定维持提供了充足水汽。杨晓亮等^[3]对 2007 年 7 月 18 日河北省东北部和南部局地暴雨过程进行诊断分析表明,在相同影响系统作用下,河北省不同区域暴雨的形成机制不同。魏东等^[4]详细分析了 2007 年 10 月 27 日发生在北京地区的一次强对流局地暴雨过程的天气系统结构特征,指出局地暴雨天气是在高空冷槽和地面冷锋系统相配合的有利大尺度环流背景下由地形和热岛效应共同作用产生的中尺度系统造成。徐远波等^[5]对 2007 年 8 月 9 日湖北郧西县境内局地突发性大暴雨过程研究表明,副热带高压及其向南摆动是局地大暴雨过程的天气尺度系统和大尺度环流背景,地面冷锋和中小尺度地形抬升为中尺度系统发展提供了很好的触发条件。王立华等^[6]分析一次局地大暴雨过程的多普勒雷达回波特征表明,回波合并效应使对流发生发展,回波少动使降水维持;主要降水由一强风暴对流单体造成,并有中气旋出现,中气旋直接引发强暴雨。梁钰等^[7]利用常规高空、地面资料及卫星、雷达、自动站资料等,对 2009 年郑州市区一次局地暴雨的预报难点进行了分析,并指出这次局地暴雨无强水汽输送和明显辐合辐散,具有明显中尺度特征。

云南地处低纬高原地区,局地暴雨是其最常见的一种灾害性对流天气,往往给当地国民经济和人民生命财产带来严重威胁。2010 年汛期,云南省局地性暴雨灾害频发,尤其是 7 月 13 日凌晨昭通市巧家县小河镇突降暴雨,山洪猛涨,山体滑坡,导致街道冲毁、民房倒塌,给人民群众生命财产造成严重损失。仅位于滇东北的昭通市,当年 7 月份就接连发生多次局地暴雨,如 7 月 17 日永善县莲峰镇暴雨(以下简称“7.17”永善局地暴雨),7 月 25 日大关县天星镇暴雨(以下简称“7.25”大关局地暴雨),7 月 27 日永善县墨翰镇暴雨(以下简称“7.27”永善局地暴雨)。为何同一地区间隔时间如此短会接连发生暴雨?本文利用常规观测资料、加密自动站资料和昭通 CINRAD/CC 多普勒天气雷达资料,对上述三次局地暴雨天气过程的环流形势、大气稳定度以及雷达回波特征进行了分析,试图得到对云南低纬度高原局地暴雨预报的若干启示,为今后该地区此类局地暴雨预报提供参考依据。

2 降水实况与环流形势

2.1 降水实况

昭通市(26°34'—28°40'N,102°52'—105°19'E)自动站资料显示,2010 年 7 月昭通北部的永善县莲峰镇、大关县天星镇、永善县墨翰镇先后于 17、25、27 日出现局地暴雨天气过程(图 1)。“7.17”永善局地暴雨过程中,

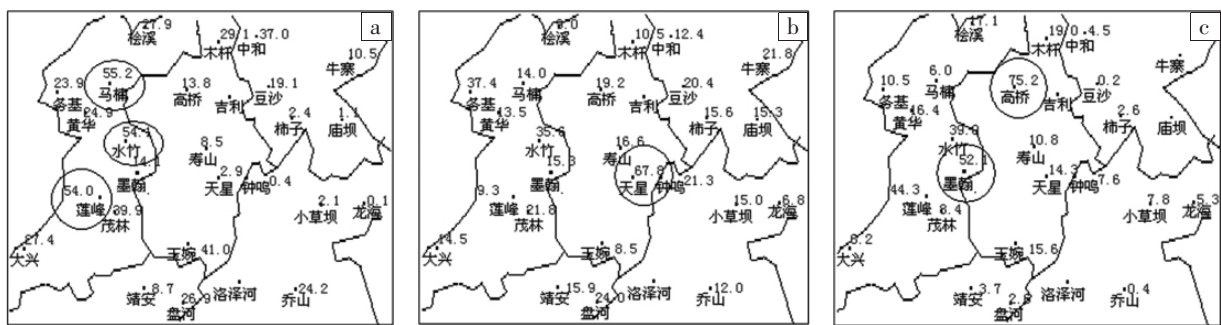


图 1 2010 年 7 月 17 日 08—20 时(a)、25 日 08—20 时(b)、27 日 20 时—28 日 08 时(c)昭通市自动站 12 h 累计雨量水平分布图(加圈处为降水量≥50 mm 站点)

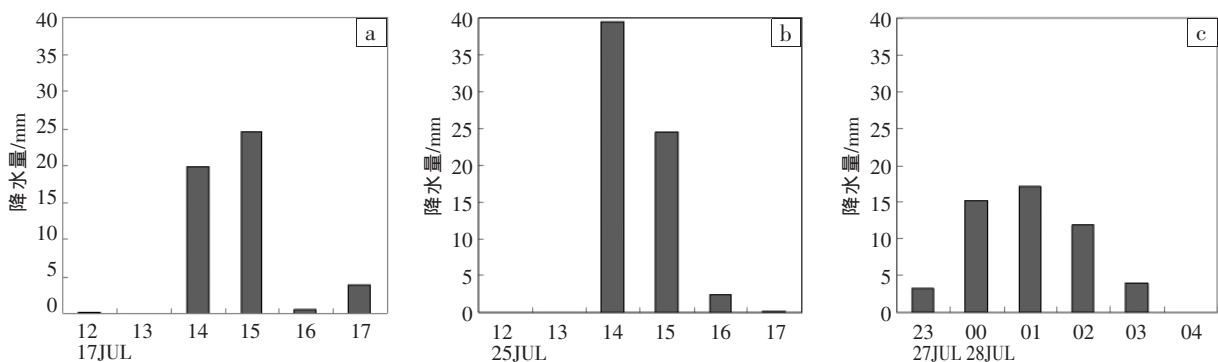


图 2 2010 年 7 月 17 日 12—17 时莲峰站(a)、25 日 12—17 时天星站(b)、27 日 23 时至 28 日 04 时墨翰站(c)逐时降水量变化图

有相邻 3 个自动站出现暴雨,其中马楠站 17 日 08—20 时(北京时,下同)12 h 降水量达 55.2 mm(图 1a),而短时降水最强出现在莲峰站,其强降水集中在 13—15 时,2 h 降水量达 44.3 mm(图 2a)。“7.25”大关局地暴雨过程中,天星站 25 日 08—20 时 12 h 降水量达 67.8 mm(图 1b),其中强降水集中在 13—15 时,2 h 降水量达 64.1 mm(图 2b)。“7.27”永善局地暴雨过程中,墨翰站 27 日 20 时—28 日 08 时 12 h 降水量达 52.1 mm(图 1c),其中强降水集中在 27 日 23 时至 28 日 02 时,3 h 降水量达 44.4 mm(图 2c)。三次暴雨过程均发生在昭通市北部,每次过程只有 1~3 个加密自动站出现暴雨,其突发性强,降水时段集中,强降水持续约 2~3 h,其他自动站降水量较小,局地特征十分明显;就空间尺度而言,三次过程均为 β 中尺度暴雨天气过程。

2.2 环流形势分析

分析表明,上述三次局地暴雨过程均发生在 7 月份,其环流形势存在共同特征。即:三次过程中西太平洋副热带高压(以下简称“副高”)脊线位于 25° — 35° N,西脊点在 90° — 110° E 之间,暴雨区均位于副高边缘。三次过程影响系统有所不同(表 1),对其分析如下:

500 hPa(图略),“7.17”永善局地暴雨过程, 120° E 副高脊线位于 27° N,西脊点位于 107° E;青藏高原中西部为高压控制,暴雨发生在两高之间辐合区内,即称两高辐合型。“7.25”大关局地暴雨过程,副高脊线位于 30° N,西脊点位于 110° E,四川盆地北部武都附近有一 5 840 gpm 低涡中心,其南侧切变线向南伸至川西高原南部西昌附近,暴雨发生在切变线东南侧,即称低涡切变型。“7.27”永善局地暴雨过程,副高较前两次过程有所加强,脊线北抬到 32° N 附近,西脊点西伸到 90° E,副高南侧有东风波自东向西移动,暴雨发生在东风波前辐合区内,即称东风波型。三次过程地面均无明显冷锋活动,但第三次过程 500 hPa 有弱冷平流侵入。

200 hPa(图略),“7.17”永善局地暴雨过程发生前,青藏高原北侧副热带西风急流位于我国内蒙古地区,中心风速 $46 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,位于 40° N、 110° E 附近。青藏高原

位置偏南,脊线位于 40° N,暴雨出现在西风急流入口区右侧强辐散区。“7.25”大关、“7.27”永善局地暴雨过程,青藏高原脊线北抬到 45° — 50° N 附近,暴雨出现在青藏高原东南侧热带东风急流入口区左侧强辐散区。

分析对流层低层环流形势可知,三次过程均出现低空急流,但急流强度和走向不同。“7.17”永善局地暴雨过程,700 hPa 出现强西南急流,贵州威宁西南风 $12 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,急流轴位于滇东北到贵州北部(图略);西南急流将孟加拉湾水汽输送到暴雨区,成为其主要的的水汽来源。“7.25”大关局地暴雨过程,700 hPa 出现强东南急流,贵阳偏南风达 $18 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,相比之下此过程急流强度最强,南海为其水汽源地,东南急流将南海水汽输送到暴雨区,对应此过程降水量和降水强度均最大(图略)。“7.27”永善局地暴雨过程,当日 08 时,700 hPa 云南省为小于 $8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的一致西南气流控制,威宁西南风速 $8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (图略);同时,850 hPa 贵阳偏南风速为 $8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,20 时偏南风增至 $10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (图略);西南气流和偏南气流从不同方向将孟加拉湾和南海水汽向高纬度地区输送,为暴雨区提供了充足水汽。此次过程由于中低层急流较弱,其降水强度也较小。

3 大气稳定度分析

分析与昭通相距约 150 km 的宜宾探空站资料发现(表 1),三次过程发生前,暴雨区均有大量不稳定能量积累。过程发生当天,大气层结呈现不稳定, K 指数在 36 — 40 $^{\circ}\text{C}$ 之间,沙氏指数 SI 小于 -0.8 $^{\circ}\text{C}$,850 hPa 与 500 hPa 假相当位温 θ_{se} 之差 $\Delta\theta_{se(850-500)} > 2.0$ $^{\circ}\text{C}$,其中“7.25”大关、“7.27”永善局地暴雨过程, $\Delta\theta_{se(850-500)} > 7.0$ $^{\circ}\text{C}$ 。“7.17”永善局地暴雨过程,风向随高度顺转,由低层西南风转为高层西北风,表现为强暖平流特征。“7.25”大关局地暴雨过程,风向随高度顺转,由低层西南风转为高层东北风,也表现出暖平流特征。第三次过程,中低层风向随高度顺转,中高层则出现风向随高度逆转特征,说明中低层存在暖平流,中高层存在冷平流,上冷下暖的不稳定层结有利于对流发生。

表 1 “7.17”永善、“7.25”大关、“7.27”永善局地暴雨过程当天 08 时宜宾探空站资料及主要影响系统和回波特征

时间	SI 指数/ $^{\circ}\text{C}$	K 指数/ $^{\circ}\text{C}$	$\theta_{se(850-500)}$ / $^{\circ}\text{C}$	主要影响系统及回波特征
2010-7-17	-1.0	40	2.3	两高辐合,西南急流,高空西风急流,逆风区,暖平流
2010-7-25	-1.6	40	7.5	低涡切变,东南急流,逆风区,暖平流
2010-7-27	-0.8	36	7.8	东风波,西南急流,逆风区,冷平流,低层辐合线

4 多普勒雷达回波特征比较分析

4.1 回波强度演变

分析昭通多普勒天气雷达基本反射率因子表明,三次暴雨过程存在如下共同特征:大面积混合型降水

回波中,镶嵌呈 SW—NE 向、强度大于 40 dBz、由对流回波单体组成的短带回波,长 30~50 km,宽 5~20 km,回波强中心达 54 dBz;强回波单体生成后稳定少动,使降水维持;暴雨出现在强回波带上,且强回波带西南端降水强度最大。按天气背景分型,三次暴雨过程

分别为两高辐合型、低涡切变型和东风波型(表 1),其雷达回波特征有所不同。

4.1.1 “7.17”永善局地暴雨过程

7月17日11时,雷达站正北方100 km附近可见分散的对流单体生成,其强度为40 dBz;12时,分散的对流单体合并为两个独立的强单体,其强度增至48 dBz,并向南移至距雷达站70~80 km范围内;14时01分(图3a),其中一个强单体减弱消失,另一个强单体发展加强并向南扩展,形成长约40 km、宽约15 km的短带强回波,强回波结构紧密,强度最大为52 dBz,回波顶高约为10 km,45 dBz以上回波达到5 km高(图4a);到了15时,回波开始减弱,其面积缩小,强回波长约20 km,宽约5 km,这预示降水开始减弱。从此次过程回波演变特征看,产生暴雨的单体在北方生成后移入并发展,随强降水结束,回波减弱消失。

4.1.2 “7.25”大关局地暴雨过程

7月25日12时,雷达站西北方70~80 km范围内有分散单体生成,各分散单体沿SW—NE向排列成带状,强度为48 dBz;12时30分,带状回波东北段强

度增至52 dBz,西南段减弱消失;13时32分(图3b),强回波面积扩大,强度继续增至57 dBz,位于雷达站西北方30~50 km范围内,回波顶高约为12 km,45 dBz以上回波达到5 km高(图4b)。此时,强降水已开始,回波西南端降水强度最大,13—14时雨强达39.5 mm·h⁻¹。14时26分,回波强中心减弱到45 dBz;15时后,回波演变为絮状。从回波演变特征看,该过程与“7.17”永善局地暴雨过程较为相似,产生暴雨的单体在北方生成后移入并发展加强。

4.1.3 “7.27”永善局地暴雨过程

7月27日21时,雷达站西北方70~120 km范围内有3个强度大于50 dBz且相对独立的对流单体呈南北向排列,单体生成源地位于西北方川滇交界处的金沙江湿热河谷地区,对流单体生成后自西北向东南方向移出源地;22时,对流单体到达永善和大关境内,遇到山脉阻挡减弱,但由于复杂地形的动力抬升作用及热力效应又导致原单体所在位置以东有新单体生成。23时02分(图3c),新生单体发展加强,出现两个强中心,其中西南侧的中心较强,强度最大达54 dBz,

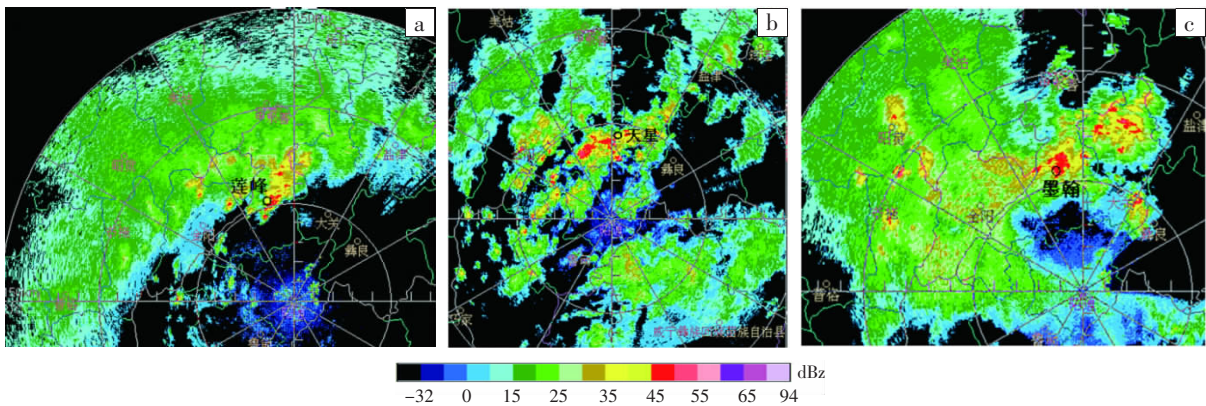


图 3 2010 年 7 月 17 日 14:01 (a)、25 日 13:32 (b)、27 日 23:02 (c) 2.4°仰角雷达基本反射率因子图

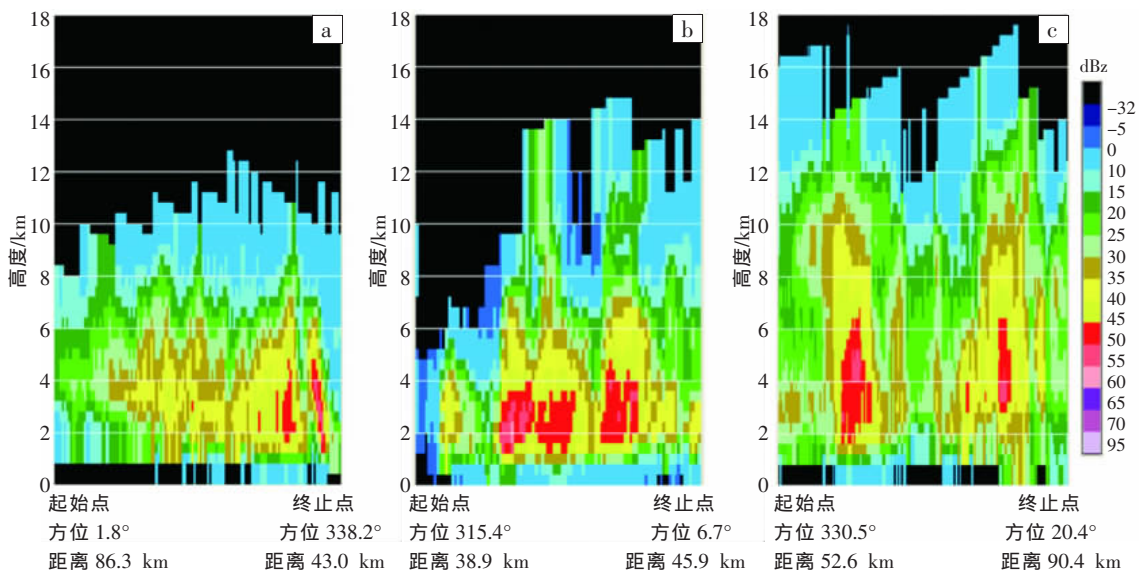


图 4 2010 年 7 月 17 日 14:01 (a)、25 日 13:32 (b)、27 日 23:02 (c) 雷达基本反射率因子垂直剖面图 RCS

同时径向速度图上出现逆风区,回波顶高达到 15 km,45 dBz 以上回波达到 7 km 高(图 4c);28 日 02 时以后,强单体减弱,周围的回波则发展加强,演变为混合性降水回波。从此次过程回波演变特征看,产生暴雨的单体就地生成、就地发展并减弱。

4.2 雷达径向速度场

4.2.1 逆风区

对逆风区与暴雨的关系,张沛源等^[8]进行过深入研究,认为逆风区反映了局部中尺度垂直环流的形成,有利于强降水发生;并将逆风区的出现作为暴雨发生的主要判据之一。三次暴雨过程中均出现了逆风区(图 5 中方框所示),且具有相同特征。即:逆风区出现位置和基本反射率因子图上强回波及暴雨出现位置相对应;对流发展最旺盛时,逆风区向上伸展高度达到 6~7 km,并随对流减弱而降低,与强降水相对应。

从三次暴雨过程逆风区和暴雨出现时间看,“7.17”永善、“7.25”大关局地暴雨过程逆风区分别出现在当日 12—15 时,强降水出现在 13—15 时;“7.27”永善局地暴雨过程逆风区出现在 27 日 22 时至 28 日 01 时,强降水出现在 27 日 23 时至 28 日 01 时。由此可见,逆风区出现 1 h 后短时暴雨开始出现,因而逆风区的出现比暴雨出现至少有 1 h 提前期,对暴雨短时预报具有重要指示意义;逆风区持续 3 h,与暴雨持续时间较为一致;降水强度随逆风区消失而减弱。

4.2.2 低空急流和高层大风区特征

分析“7.17”永善局地暴雨 700 hPa 风场可知,西南急流轴位于滇东北到贵州北部。由于暴雨区离雷达站较远(约 50~80 km),雷达站附近无足够的降水粒子,缺少观测的载体,因而无法观测到低空急流,但却能观测到高层大风区特征。17 日 11 时开始,雷达站东北方和西方分别出现 $12 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的正负速度中心;12 时,速度大值区面积迅速扩大;14 时 01 分(图 5a),雷达站东北方 60~110 km 和西方 110~140 km 范围内出现大片 $14 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的正负速度区。大风区位于 5 km 高度以上,表现为高层大风区特征。这与周雨华等^[9]在分析一次副高边缘暴雨的多普勒雷达回波特征时发现的相关事实一致。

对“7.25”大关局地暴雨过程,雷达探测到东南急流。25 日 12 时开始,雷达站西北方和东南方分别有 $10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的正负速度中心对称出现;13 时 32 分(图 5b),雷达站西北方到东北方 70~120 km 范围内有大片 $12 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 正速度区,雷达站南方 50~80 km 范围内则出现 $12 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 负速度中心,另在雷达站西北方和东南方 10~20 km 范围内对称出现 $12 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 正负速度中心。正负速度区覆盖范围距雷达站 10~120 km,说明东南

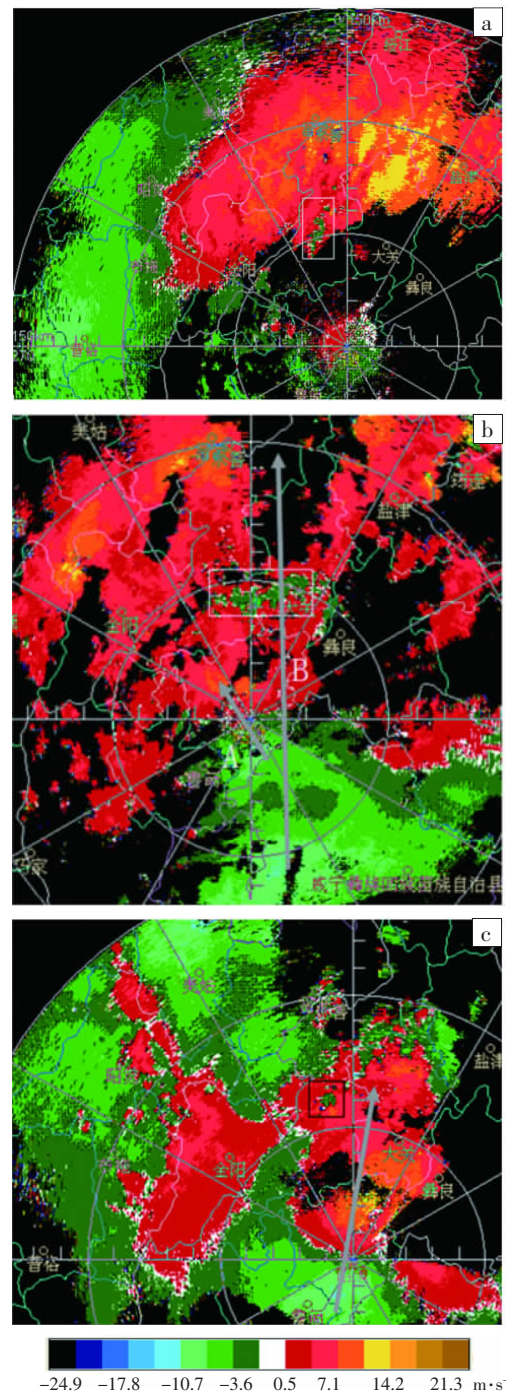


图 5 2010 年 7 月 17 日 14:01 (a)、25 日 13:32 (b)、27 日 23:02 (c) 2.4°仰角雷达径向速度图
方框所示为逆风区;灰色箭头为低空急流,A 为低空东南气流,B 为较高层偏南气流;距离圈每圈 50 km

急流一直维持,并在不同高度形成不同输送带,低空为东南气流(A),较高层为偏南气流(B),风向随高度顺转,表现出东南急流的暖平流特征;东南急流造成环境风场暖湿垂直切变,并以此形式向暴雨区输送动量、热量和水汽。

“7.27”永善局地暴雨过程中,雷达也探测到西南急流。27 日 23 时 02 分(图 5c),雷达站南北两侧 10~20 km 范围内分别出现 $10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 正负速度中心,是低

空急流在速度图上的反映;低空急流位于 1.5~3.0 km 高度范围内,暴雨区位于低空急流左前侧强辐合区。

4.2.3 冷、暖平流

“7.17”永善、“7.25”大关局地暴雨过程,雷达探测区内均出现暖平流,其中前一过程雷达站北方出现 SW—NE 向零速度线,零速度线呈正“S”形弯曲,风向随高度顺转,零速度线两侧分别出现 $12 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 正负速度中心,表现为强暖平流特征(图 5a)。“7.27”永善局地暴雨过程,雷达探测区内出现了冷平流特征。雷达速度图上(图 5c),雷达站西北方 140 km 附近有 $12 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 负速度中心,说明高层有冷平流侵入,冷平流和偏南暖湿气流在雷达站西北方 70 km 附近交汇,形成一条 SW—NE 向低层中尺度辐合线,低层辐合线自西北向东南方向移动,暴雨发生在中尺度辐合线前。冷暖气流交汇导致对流发展更旺盛,“7.27”永善局地暴雨过程对流发展高度达 15 km,大于 45 dBz 强回波顶高达 7 km,其他两次过程对流发展高度在 12 km 以下,大于 45 dBz 强回波顶高在 5 km 以下(图 4)。

5 结论与讨论

本文利用常规观测资料、加密自动站资料和多普勒天气雷达资料,对滇东北 2010 年 7 月接连发生的三次局地暴雨过程进行了诊断分析。主要结论如下:

(1) “7.17”永善、“7.25”大关、“7.27”永善局地暴雨过程环流背景有所不同,其分别为两高辐合型、低涡切变型和东风波型。三次过程也有相似之处:天气尺度系统均存在低层辐合、高层辐散特征;均出现低空急流,并为暴雨区提供了充足的水汽和能量条件;暴雨发生前大气处于层结不稳定状态, K 指数大于 $36 \text{ }^{\circ}\text{C}$, SI 指数小于 $-0.8 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

(2) 在雷达基本反射率因子演变上,三次暴雨过程均由 SW—NE 向短带对流回波单体产生,强回波带西南端降水强度最大;“7.17”和“7.25”过程暴雨单体为北方生成移入,就地发展,就地减弱,“7.27”过程暴雨单体为就地生成、就地发展并减弱。

(3) 在雷达径向速度图上,三次暴雨过程均出现

逆风区。逆风区与暴雨落区有较好的对应关系,逆风区向上伸展高度与降水强度相对应。逆风区的出现比暴雨出现有 1 h 提前期,对暴雨短时预报具有重要指示意义。

昭通地处滇东北低纬高原山区,位于云贵高原到四川盆地斜坡过渡地带,呈西南高、东北低的倾斜地势。全市区域内海拔 2 500 m 以上的高山多出现在金沙江沿岸五莲峰山脉不同地段。从三次过程选取的三个自动站位置看,三站均位于五莲峰北段东北坡,相互间距离不超过 30 km,但海拔高差很大。“7.17”永善局地暴雨中心莲峰站海拔 2 136 m,位于五莲峰北部主峰附近;“7.27”永善局地暴雨中心墨翰站海拔 1 013 m,“7.25”大关局地暴雨中心天星站海拔仅 711 m。产生 3 次暴雨过程的强单体均在暴雨区北方生成,在其向南移动过程中受山脉动力抬升作用而加强。是否可以认为,中尺度地形抬升作用是一种暴雨触发机制;复杂地形与该地区局地暴雨频发存在一定关系。此类问题还有待于进一步研究。

参考文献:

- [1] 郭虎,季崇萍,张琳娜,等.北京地区 2004 年 7 月 10 日局地暴雨过程中的波动分析[J].大气科学,2006,30(4):703-711.
- [2] 祁东平,周建志,王珊珊,等.一次局地强降水过程的中尺度特征及预报难点分析[J].暴雨灾害,2008,27(1):42-47.
- [3] 杨晓亮,李江波,杨敏.河北 2007 年 7 月 18 日局地暴雨成因分析[J].气象,2008,34(9):47-56.
- [4] 魏东,杨波,孙继松.北京地区深秋季节一次对流性暴雨天气中尺度分析[J].暴雨灾害,2009,28(4):289-294.
- [5] 徐远波,尹恒,谭永秀,等.副高边缘一次局地突发性大暴雨过程的中尺度分析[J].暴雨灾害,2009,28(1):58-63.
- [6] 王立华,尹恒,姚道强,等.鄂西北一次局地大暴雨过程的多普勒雷达回波分析[J].暴雨灾害,2009,28(3):246-250.
- [7] 梁钰,邵宇翔,席世平,等.一次弱环境场下的郑州局地暴雨预报难点分析[J].气象与环境科学,2010,33(3):23-28.
- [8] 张沛源,陈荣林.多普勒雷达速度图上的暴雨判据研究[J].应用气象学报,1995,6(3):372-376.
- [9] 周雨华,黄小玉,黎祖贤,等.副高边缘暴雨的多普勒雷达回波特征[J].气象,2006,32(1):12-17,129.