常德市2002年5月13日大暴雨成因解析

廖玉芳[1] 唐小新[2] 陈 媛[3] 葛文忠[4]

(1. 湖南省气候中心,长沙 410007; 2. 湖南省永州市气象台;
3. 湖南省气象局; 4. 南京大学大气科学系)

提 要: 用多普勒天气雷达产品、NCEP 1°×1°再分析资料、卫星云图产品、实时探测资料及MM5数值模拟,对2002年发生在湖南常德境内的"5.13"大暴雨进行解析,得出此次暴雨过程由高空低槽、中低层切变及西南急流、地面倒槽和弱冷空气共同影响产生,急流形成、发展与减弱对降水强度有直接的影响。暴雨中心与云图上的"U"形缺口区、多普勒基本速度场上的中低层急流轴线位置有较好的对应关系。多普勒基本速度场上急流强弱振荡出现的时间、低层暖平流之上(高层)出现冷平流的时间、低层气旋式涡旋流场的形成与维持以及低层垂直风切变强度变化对强降水发生的时间有明显的指示作用。数值模拟证实雷达探测到的中尺度涡旋、急流及辐合带是正确的。这些结论对暴雨临近预报业务具有明确的参考价值。

关键词: U形缺口 暖平流 急流 中β尺度低涡 切变 暴雨

An Analysis of Causes of the Heavy Rainfall on 13 May 2002 in Changde City

Liao Yufang[1] Tang Xiaoxin[2] Chen Yuan[3] Ge Wenzhong[4]

(1. Climate Center of Hunan Meteorological Bureau, Changsha 410007; 2. Meteorological Observatory of Yongzhou City;
3. Hunan Meteorological Bureau; 4. Department of Atmospheric Sciences, Nanjing University)

Abstract: The heavy rainfall in Changde on 13 May 2002, Hunan Province in 2002 was analyzed based on Doppler weather radar products, NCEP 1°× 1° reanalysis data, satellite cloud image products, real-time detection data and MM5 numerical simulations. It is found that the rainfall event was caused by joint influences of upper-level troughs, middle-low-level shears, southwest jets, ground inverted troughs and a weak cold air. How the jet formed, developed and weakened had a direct impact on the intensity of rainfall. The rainfall center corresponded well to the "U"-shaped gap of satellite cloud image and the middle-low jet axis of Doppler base velocity field. When the jet in the Doppler basic velocity field vibrated, the cold advection above the low level warm advection appeared, low-layer cyclone vortex

资助项目: 中国气象局新技术推广项目(CMATG2007M39)
收稿日期: 2008年1月22日; 修定稿日期: 2009年2月24日

field formed and maintained, and low-level vertical wind shear changed, it could instruct conspicuously that heavy rainfall would occur. Numerical simulation has proved the mesoscale vortex, jets and convergence to be consistent with those detected by radar. All these results have valuable reference to rainfall nowcasting.

Key Words: U-shaped gap　warm advection　jet　meso-β scale vortex　shear　heavy rainfall

引　言

湖南有 5 个暴雨中心[1],分别位于雪峰山脉、湘东南罗霄山脉、湘南阳明山和九嶷山、湘西北澧水上游桑植一带和湘东北幕阜山、连云山一带,暴雨种类多[2],形成机制复杂。一般认为,暴雨产生于一定的大尺度天气环境背景下,由中尺度系统直接触发[3]。虽然数值预报技术的发展[4-5]使预报员已经可以较准确有效地进行时效为 7 天左右的大尺度天气形势预报,但暴雨的预报准确率还有待提高,其原因在于对中尺度系统的把握仍然存在很多困难。为了研究和揭示暴雨过程中的中尺度系统活动规律和机理,目前应用了多种气象手段和方法,例如李海红等[6]通过分析 20 年的资料研究了青藏高原东部大到暴雨的卫星云图演变特征,王登炎[7]研究了暴雨分级卫星云图模型和模式识别,谌芸等[8]用数值模拟的方法对青藏高原东北部区域性大到暴雨进行了诊断分析,而利用雷达探测资料探讨暴雨过程的中尺度系统活动规律的研究则更多[9-14],这些研究从不同角度提升了对暴雨的认知水平。

2002 年 5 月 12 日 20 时至 13 日 20 时(北京时)(简称"5.13")湖南常德市中南部普降暴雨,其中沅水流域普降大暴雨(日平均雨量为 136.9mm,其中汉寿县城达 148.4mm),造成沅水流域几个县市的 96 座水库因暴满而溢洪,沅水倒灌,损坏水利工程、路段、高低压线路、房屋及农作物等,并使常德城区低洼地段积水 0.5～0.8m,直接灾害损失 3.61 亿元人民币。

本文利用常规天气图、多普勒天气雷达资料、卫星云图、NCEP1°×1°每 6 小时再分析资料及实时探测资料对"5.13"常德大暴雨过程进行综合分析,以期分析出在特定的天气系统影响下多普勒天气雷达探测信息的响应特征,并用 MM5 数值模拟对多普勒天气雷达探测出的中尺度系统进行模拟和佐证,为暴雨临近预报提供参考。

1　环境场分析

2002 年 5 月 12 日 08 时至 13 日 20 时 500hPa 高空图(图略)上可以清楚地看到有高原低槽东出并影响暴雨所在地,中低层(850hPa、700hPa)切变位于湖北南部、湖南北部,切变南侧西南急流生成并迅速加强,地面西南倒槽发展,冷空气从偏北路径扩散南下。在上述天气系统的共同影响下,常德沅水流域出现了大暴雨过程。

选取离暴雨区最近的长沙探空站 12 日 20 时、13 日 08 时探空资料进行对比分析(表 1),可以看到850hPa、700hPa西南风风

表 1　常德暴雨过程前后长沙探空信息

	12 日 08 时	12 日 20 时	13 日 08 时	13 日 20 时
850hPa 风向/°	150	185	225	295
850hPa 风速/m·s^{-1}	4	4	20	13
700hPa 风向/°	245	225	230	265
700hPa 风速/m·s^{-1}	6	14	27	22
K 指数/℃	4	21	38	39
沙氏指数/℃	4.3	7.8	−0.5	−1.5
CAPE* /J·kg^{-1}	0	2	169	41

* CAPE 值来源于 NCEP 资料

速分别增大了16、13m·s^{-1}，K指数增加17℃，沙氏指数减小8.3℃，CAPE值(对流有效位能)增加167J·kg^{-1}。说明12日20时至13日08时西南急流迅速形成并加强，气层不稳定度增大，具备产生对流降水的条件，但由于对流有效位能偏小，不易产生强对流天气。

2 云图上的U形缺口与暴雨落区

5月12日18:25GMS-5卫星云图上，常德、汉寿、桃源处于倒"U"形缺口中(图1，见彩页)，湖北、陕西、四川东部基本为云顶亮温为－42℃的云层所覆盖，贵州到云南一线有对流云团发展。随着主云区的东移及对流云团的发展，13日01:32，安徽、湖北东部、湖南北部、贵州北部、重庆到云南南部一线发展成一条云带；03:32云团头部已位于湖南北部(原U形缺口中)，中心在常德附近，云带上不断有对流云团发展东移，形成常德沅水流域长达9小时的强降雨。

U形缺口边缘清晰，亮温梯度大，是对流云系强烈发展的一个信号，这点可从垂直速度的分析得到验证。利用NCEP1°×1°每6小时的再分析资料，经缺口中心(28°N、111.7°E)作纬向垂直剖面分析(图2)，可以发现，缺口西侧为上下一致的上升气流，垂直上升速度最大达到了－1.0Pa·s^{-1}，形成的次级环流使得缺口附近为上下一致的下沉气流，最大下沉速度达到了0.3Pa·s^{-1}，强烈的对流还使得缺口东侧的高层(400hPa～200hPa)出现了－0.4Pa·s^{-1}的上升速度中心。随着系统的东移，对流迅速发展到缺口位置，并趋于稳定(图略)，进而出现常德的暴雨灾害。

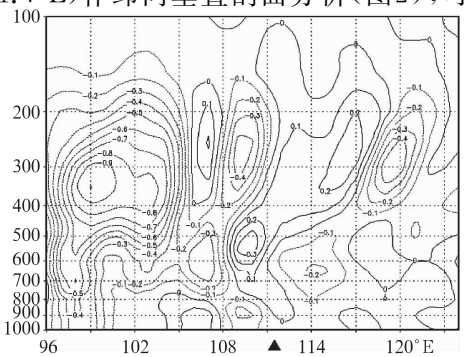


图2 2002年5月12日14时沿28°N(经U形缺口中心)纬向垂直剖面垂直速度
单位：Pa·s^{-1}；▲为暴雨中心位置

3 多普勒雷达探测信息

多普勒天气雷达对降水区的发生、发展和演变有强的探测能力[15]，本次暴雨过程中，常德多普勒天气雷达站的探测资料提供了很多中尺度天气系统信息。

3.1 降水回波特征

图3a(见彩页)中，25～30dBz强度的回波带横跨雷达中心平面，宽120km、长近400km，35～40dBz的片状回波中嵌有45dBz以上的块状回波。图3b(见彩页)显现出40dBz以上的回波带环绕在距雷达50km的距离圈上，回波所在高度约4.6km，与0℃层高度(5.0km)基本对应。在雷达回波移动方向(NE-SW)上沿径向(230°方位)作基本反射率因子垂直剖面，呈现出在常德西南方有无数30dBz以上的回波柱排列成串，且由远而近回波柱的高度增高，回波强度增强。上述特征表明此次降水回波具有典型的混合性降水回波(有对流性降水回波特征的块状及强度，有层状云降水回波特征的片状和零度层亮带)特点[16]，云团由西南方移近常德时发展，在影响常德的过程中具有明显的列车效应。

统计影响常德测站的降水回波强度得出，35dBz(降水率5.4mm·h^{-1})以上回波影响时间为7.5小时，其中40dBz(降水率12.2

mm·h^{-1})以上回波影响时间为 1.7 小时。35dBz 以上回波出现在 13 日 03—12 时,累计时间占到 7.5 小时的 80.0%,40dBz 以上回波全部出现在上述时间段内。常德 13 日 03—12 时降水实况为 93.9mm,占全天降雨量的 68.6%。由此可见,形成本次大暴雨的降水回波主要是 35dBz 以上的回波。

根据 *Z-R* 经验型数学模型关系[17](*Z*:反射率因子,*R*:降水率)$Z=300R^{1.4}$,以常德地面观测站所在地为中心(距离雷达站 15km),在 0.5°仰角产品上选取中心附近的 9 个点求反射率因子的平均值及最大值,进而进行逐时降水估算,结果表明,二种方法估算的逐时降水变化趋势均与实况一致,且用最大值估算的结果与实况更为接近(图 4)。

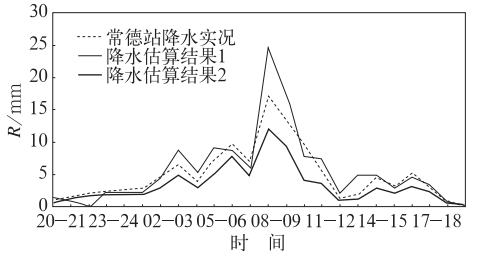


图 4　常德站 2002 年 5 月 12 日 20 时至 5 月 13 日 18 时降水实况及雷达降水估算结果

3.2　温度平流及低涡

多普勒径向速度图上,低层"S"形的零速度线(表明低层风随高度顺转,有暖平流)形成在 12 日 19:57,垂直伸展高度为 3km,21:28 进入强盛时期(图略),13 日 05:20 暖平流强度开始减弱,"S"南部曲率减小,维持时间长达 8 小时,表现为强劲的低层暖平流。中高层(3.0km 以上高度层)冷平流(反"S"形的零速度线)形成在 13 日 06:46,07:58 达强盛阶段。

长时间强的低层暖平流把水汽输送到降水区,形成湿中心(中低层暖切变附近),高层冷平流的出现增大了大气层结的不稳定性,利于对流发展而产生强降水。

由图 5(见彩页)可看出,常德西北部(临澧附近)的零速度线呈气旋式弯曲,根据零速度线推出该地既存在垂直风切变,也存在辐合性气旋流场结构;东南部的零速度线气旋式弯曲则指示出强垂直风切变的存在及一个以汉寿为中心的小辐合源的存在。从而构成了常德、桃源、汉寿位于低涡流场结构的东南部,汉寿位于辐合流场中心,并存在明显的垂直风切变的环流结构。此结构形成于 13 日 06:33,7:20 达到最强,08:53 后减弱消失,其后在桃源、常德、汉寿一线维持一明显的风速辐合带。对照实况降水曲线(图 4)可以看出,气旋涡旋流场及垂直风切变的形成和维持与强降雨的发生和维持密切相关。

事实上,对照由 NCEP 再分析资料得到的 13 日 08 时 800hPa 的风场(图 6)可以看出,雷达径向风确实反映了常德西北的低涡环流,而且雷达探测到了汉寿附近的辐合等细微的风场信息。

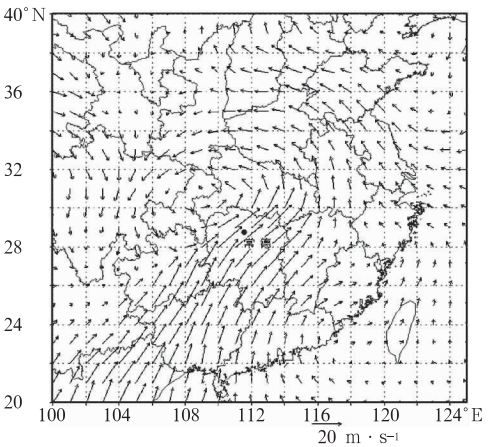


图 6　2002 年 5 月 13 日 08 时 800hPa 风场

3.3　急流

通过 VWP 产品获取的不同高度急流随时间的变化曲线表明,1.5km 高度 12m·s^{-1} 以上的低空西南急流形成于 12 日 21:28 前后,13 日 5:26 至 7:39 为急流最强盛阶段(最大风速 18m·s^{-1}),7:44 开始减弱并于

12:20消失，维持时间近15小时。

3km高度12m·s^{-1}西南风急流形成于12日15:52，18:01达到16m·s^{-1}，13日3:05至4:18为该高度急流的强盛期(最大风速26m·s^{-1})，16:33减弱到16m·s^{-1}以下，维持时间长达21小时。其间急流风速经历了2次6m·s^{-1}的跳跃式上升(12日18:43至19:14，13日2:10至3:05)和1次6m·s^{-1}的跳跃式下降(13日5:50至7:06)。

5.2km高度12m·s^{-1}西南风急流形成于12日14:53，20:45达到20m·s^{-1}，最强风速时段在13日1:58至2:22(28m·s^{-1})，跳跃式下降出现时间在4:55至6:02，在1.1小时内风速减小了10m·s^{-1}。

上述分析表明，12m·s^{-1}西南中低空急流形成时间低层晚于高层，而开始减弱的时间高层先于低层，相差近1小时。地面波峰降水与1.5km高度急流减弱的时间有较好的对应关系，而5.2km高度20m·s^{-1}急流减弱与其后降水增强有很好的对应关系(3个降水波峰对应有3个风速减弱阶段)。这在很大程度上反映了中低空急流的振荡与强降水之间的关系。

13日05:56风暴相对径向速度图(3.4°仰角)可分析出中低层及高空二支强的西南急流，中低层急流正负中心分别位于桃源、南县附近，高空急流正负速度中心位于华容、凤滩附近，急流轴呈现WSW-ENE向，本次暴雨的分布基本沿中低空急流轴线展开，大暴雨中心就出现在急流中心附近。

3.4 低层垂直风切变

低层垂直风切变(0.6～1.5km)随时间的变化曲线(图略)表明，风切变于12日21:51有一个跳跃式上升(由5.0×10^{-3}s^{-1}上升到1.0×10^{-2}s^{-1})，13日05:01至08:59达到强盛期(2.0×10^{-2}s^{-1}以上)，16:02开始急剧减弱(由1.7×10^{-2}s^{-1}下降到0.7×10^{-2}s^{-1})。对照地面降水实况发现切变急剧增大则降水强度明显增强，急剧减小则降水强度明显减弱；5mm·h^{-1}以上的雨强与1.5×10^{-2}s^{-1}以上的高切变值对应较好，10mm·h^{-1}以上的雨强与2.0×10^{-2}s^{-1}以上的强切变值相对应。

4 数值模拟结果

为了更好地研究这次暴雨过程，我们用MM5数值模式进行了模拟，作了850hPa上几个时刻的高空流场图。在12日20时，西南涡一直东移，其间在13日05—08时，中α尺度低涡在西南急流的影响下向东伸展的曲率愈来愈大，终于在13日08时形成一条从28°N、109°E至30°N、111°E呈西南—东北向的辐合线，与实况很接近(图7)。13日11时，在西南涡内部产生出两个中β尺度低涡(图8)。13日11—14时，左边的低涡逐渐减弱，右边的低涡逐渐增强，13日15时，西边的低涡最终消亡，东边的低涡也并入了中α尺度低涡，如图9。从这次天气过程可看出，5月12日18:25在湖南常德出现倒“U”形缺口，为在湖南常德上空云团的发展提供了条件，它与气流的辐合和中β尺度低涡的发展有关。13日08时西南急流的急速辐合使新生云团不断在“U”形缺口发展，从高空流场

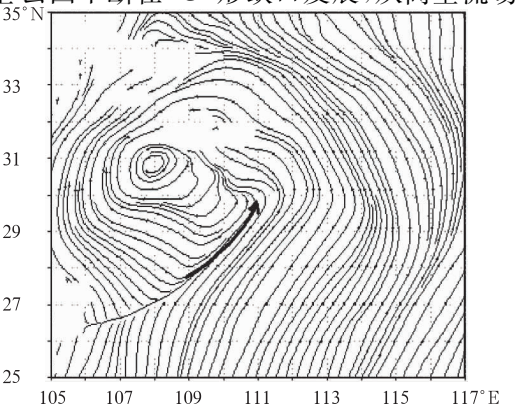


图7 2002年5月13日08时850hPa高空流场图

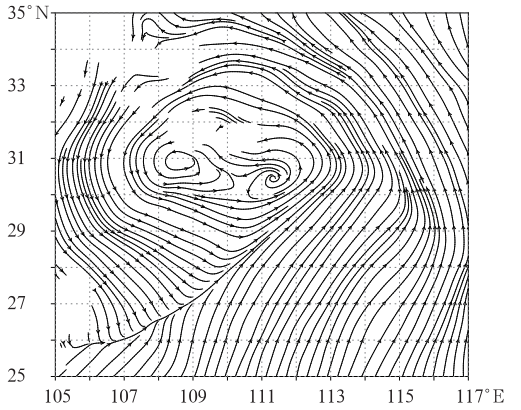


图 8　2002 年 5 月 13 日 11 时 850hPa 高空流场图

来看,西南涡不断东移,西南急流的辐合促使了两个中 β 尺度低涡的发生,此时“U”形缺口里云团发展最盛,也是暴雨雨强最强的时刻,随着东边中 β 尺度低涡的增强,西边中 β 尺度低涡的减弱,最后东边的中 β 尺度低涡并入中 α 尺度低涡,暴雨雨强也对应由开始逐渐发展到最强然后再减弱,可见中 β 尺度低涡和暴雨密切相关。

5　结语

(1)“5.13”暴雨是高空低槽、中低层切变、西南急流、地面冷空气及西南倒槽共同作用的结果。长沙探空资料表明强降水发生阶段中低层西南急流处于强盛时期,大气层结不稳定,有利于对流性降水发生,但由于对流有效位能小,限制了深对流的发展,这点可从雷达探测到的降水回波性质(积层混合性降水回波)予以印证。

(2)“5.13”暴雨区位于中低层急流轴附

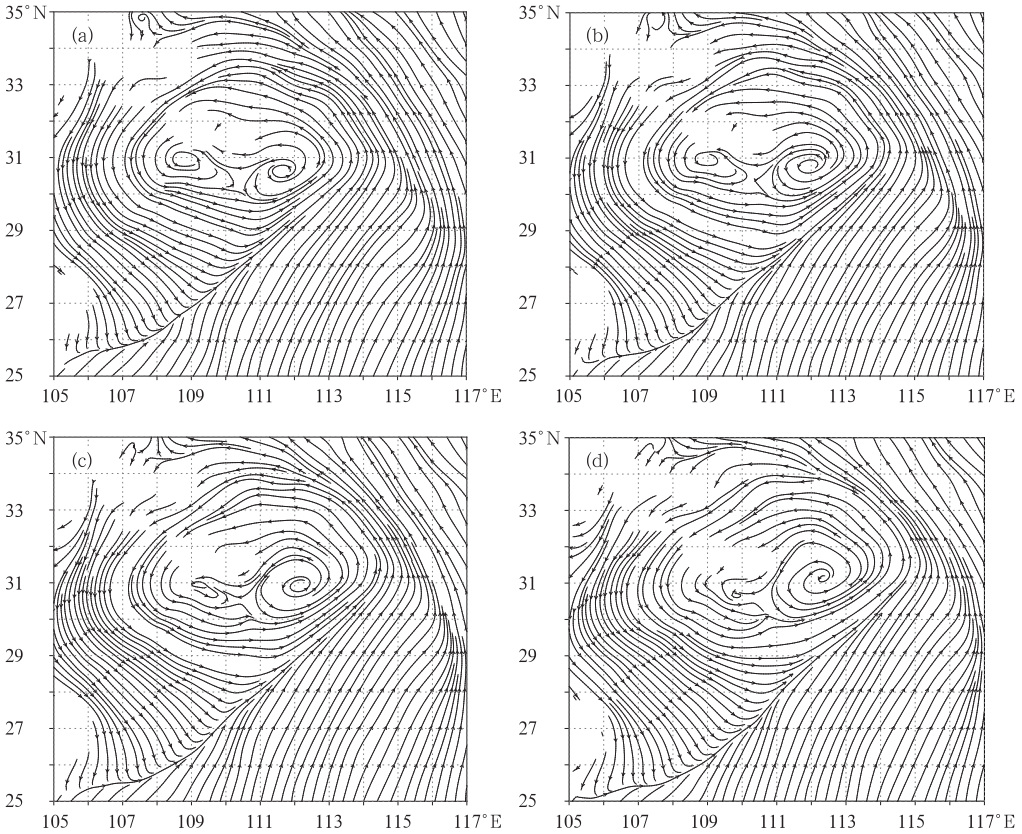


图 9　2002 年 5 月 13 日 12—15 时 850hPa 高空流场图

(a) 12 时; (b) 13 时; (c) 14 时; (d) 15 时

近，大暴雨中心位于云图上“U”形缺口区。

（3）多普勒雷达产品对临近暴雨落区预报有强的预报能力。强的中低层暖平流之上（高层）有冷平流出现是降雨强度加强的信号；中低层急流轴线为暴雨落区所在，急流中心位置与大暴雨中心位置有较好的对应关系，急流发展到最强盛时减弱将标示强降雨时段的开始；降雨强度随低层垂直风切变的加强而加强，随切变强度减弱而减弱；气旋式涡旋流场的形成和维持构成了本次大暴雨雨强的峰值；降水的持续时间及强度与雷达强度回波的降水属性有关，混合性降水回波产生的降水持续时间长，降水效率高。

（4）雷达探测到中尺度辐合流场、低涡、急流均已为数值模拟所证实，说明多普勒雷达对中尺度系统有较强的探测能力，从而为暴雨临近预报提供了有力的技术支持。

（5）云图上“U”形缺口区形成的原因有待探讨。

参考文献

[1] 卢翔. 湖南省山洪灾害成因分析[J]. 人民长江，2003，34(6)：52-54.

[2] 黄小玉，陈媛，顾松山，等. 湖南地区暴雨的分类及回波特征分析[J]. 南京气象学院学报，2006，29(5)：635-643.

[3] 陶诗言. 中国之暴雨[M]. 北京：科学出版社，1980.

[4] 薛纪善. 和预报员谈数值预报[J]. 气象，2007，33(8)：3-11.

[5] 周雨华，毛亮，何正阳，等. 数值预报产品在2002年汛期暴雨预报中的应用[J]. 气象，2003，29(11)：41-44.

[6] 李海红，戴升，史津梅，等. 青藏高原东部大到暴雨卫星云图演变特征[J]. 气象，2000，26(10)：53-55.

[7] 王登炎. 暴雨分级卫星云图模型和模式识别[J]. 热带气象学报，2001，17(3)：242-250.

[8] 谌芸，李强，李泽椿. 青藏高原东北部强降水天气过程的气候特征分析[J]. 应用气象学报，2006，17：98-103.

[9] 张家国，廖移山，李德俊，等. “98.7”鄂东连续特大暴雨的中尺度分析（一）[J]. 气象科学，2001，21(2)：169-177.

[10] 郭荣芬，鲁亚斌. “2002.6.30”滇中低涡暴雨的中尺度分析[J]. 气象，2003，29(2)：29-33.

[11] 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.

[12] 梁海河，阮征，葛润生. 华南暴雨试验天气雷达数据处理及暴雨中尺度结构个例分析[J]. 应用气象学报，2004，15(3)：281-290.

[13] 薛秋芳，梁海河，张沛源. 中-β尺度对流云团造成特大暴雨过程的分析[J]. 气象，2001，27(2)：39-43.

[14] 刘洪恩. 单多普勒天气雷达在暴雨临近预报中的应用[J]. 气象，2001，27(12)：17-22.

[15] 夏文梅，张亚萍，汤达章，等. 暴雨多普勒天气雷达资料的分析[J]. 南京气象学院学报，2002，25(6)：787-794.

[16] 张培昌，杜秉平，戴铁丕. 雷达气象学[M]. 北京：气象出版社，2001：329-331，427.

[17] 俞小鼎，姚秀萍，熊廷南，等. 多普勒天气雷达原理与业务应用[M]. 北京：气象出版社，2006：221-222.

廖玉芳等：常德市2002年5月13日大暴雨成因解析

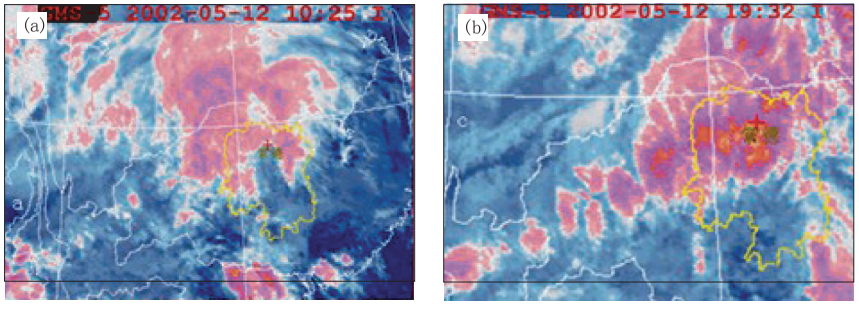


图 1　不同时次的卫星云图（图中时间GMT）
(a) 2002年5月12日10:25; (b) 2002年5月12日19:32

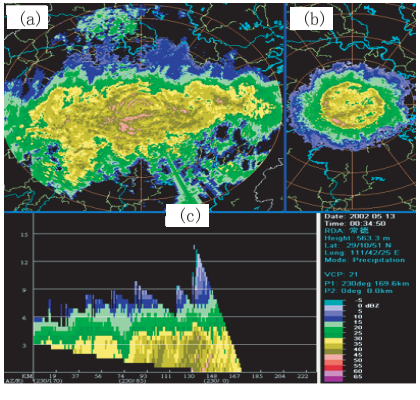


图 3　常德多普勒天气雷达2002年5月13日08:34观测资料
(a) 组合反射率因子，(b)4.3°仰角基本反射率因子，(c)反射率因子垂直剖面

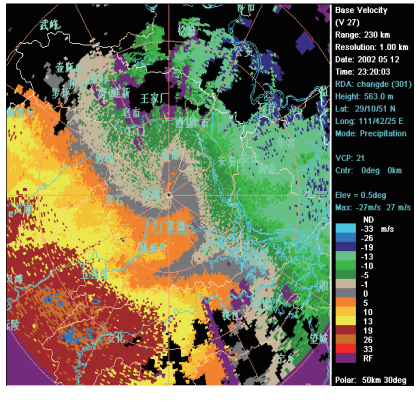


图 5　2002年5月12日23:20(GMT) 0.5°仰角基本速度图因设置原因，常德2002年8月前的雷达速度产品冷色表示远离雷达，暖色表示朝向雷达