

# 一次孟加拉湾风暴和冷空气影响下滇西大暴雨中尺度分析\*

鲁亚斌<sup>1)</sup> 张腾飞<sup>1)</sup> 徐八林<sup>2)</sup> 杨明<sup>1)</sup> 周国莲<sup>1)</sup> 索渺清<sup>3)</sup> 寸灿琼<sup>4)</sup>

<sup>1)</sup>(云南省气象台,昆明 650034) <sup>2)</sup>(云南省气象装备中心,昆明 650034)

<sup>3)</sup>(思茅市气象局,思茅 665000) <sup>4)</sup>(德宏州气象局,潞西 678400)

## 摘要

应用 MICAPS 资料,通过天气诊断分析,结合 FY-2 卫星云图及德宏 CINRAD-CC 雷达体扫资料,分析了发生在 2004 年 5 月 18 日滇西地区的大暴雨过程。发现本次大暴雨过程天气尺度影响系统为初夏孟加拉湾风暴及南下冷锋切变;大暴雨发生在高能高湿的水汽辐合中心、700 hPa 螺旋度正值区及湿 Q 矢量散度大值辐合区内;卫星云图上,多个  $\beta$ -中尺度对流系统在大暴雨区发展;多普勒雷达回波为絮状混合型降水回波,强度在 30~44 dBz 之间,频繁出现的逆风区、低空急流、中尺度辐合线等中小尺度系统是造成本次大暴雨的直接影响系统。

关键词:大暴雨;诊断分析;卫星云图;多普勒雷达特征

## 引言

2004 年 5 月中旬,一个强热带风暴在孟加拉湾发展,云南受此强孟加拉湾风暴和冷空气、切变线的共同影响,出现了连续 3 d 的大雨、暴雨强降水天气过程,暴雨天气主要集中在滇西到滇南一线。其中 5 月 18 日 08:00(北京时,下同)~19 日 08:00,滇西出现大暴雨天气过程,大暴雨集中分布在滇西的保山、德宏、临沧 3 个地区,日雨量超过 100 mm 的大暴雨有 6 个县站,大暴雨中心在保山地区的龙陵县,日雨量达 124.3 mm。出现如此集中的大暴雨天气,在云南历史同期还是第一次,刷新了历史记录。

热带风暴是造成我国暴雨的重要天气系统,对西太平洋上发生、发展的热带风暴(台风)我国学者已有长期的系统研究,因而对西太平洋热带风暴(台风)的预测水平有较大提高,且还不断获得新的认识<sup>[1-4]</sup>;然而对孟加拉湾发生、发展的热带风暴的研究却相对较少。事实表明,孟加拉湾风暴对我国西南地区的暴雨有重要影响。为了揭示本次大暴雨发生的物理原因,加深孟加拉湾风暴活动对我国暴雨影响的认识,本文应用 MICAPS 资料进行诊断分

析,结合 FY-2 卫星云图和德宏 CINRAD-CC 雷达体扫探测资料,综合分析了这次大暴雨过程发生的环境场条件,以及造成这次强暴雨的中小尺度影响系统,以期今后的业务预报提供一些有价值的参考。图 1 为 2004 年 5 月 18 日大暴雨过程雨量分布图。

## 1 大暴雨发生的环境场条件

### 1.1 水汽条件

700 hPa  $\theta_{se}$ 场上温湿场的特征表现较为显著,过程开始前,5 月 17 日在滇西有一  $\theta_{se}$ 大值中心,此大值区到 18 日 08:00 就演变为一暖湿舌,控制着云南。滇西  $\theta_{se}$ 高达 344 K,并维持到 19 日 08:00。暖湿舌的存在表明:有强的水汽输送,并可提供大气不稳定层结,而暖湿舌的制造者,正是孟加拉湾风暴(图 2a)。

暴雨发生需要有大量水汽输送且水汽在暴雨区上空强烈辐合。从 700 hPa 水汽通量散度及  $u-v$  风场合成图可看出,水汽通量辐合区沿切变线分布,水汽通量散度高达  $-50 \times 10^{-10} \text{g} \cdot (\text{hPa} \cdot \text{s})^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$ ,切变线造成的辐合上升运动使水汽辐合中心就分布在滇西到滇南一线,水汽辐合中心与大暴雨区相一致,因而充沛的水汽输送及辐合为滇西大暴雨的发生提供了

\* 云南省“十五”攻关项目 2001 NG43 资助。  
2004-12-08 收到,2005-11-02 收到再改稿。

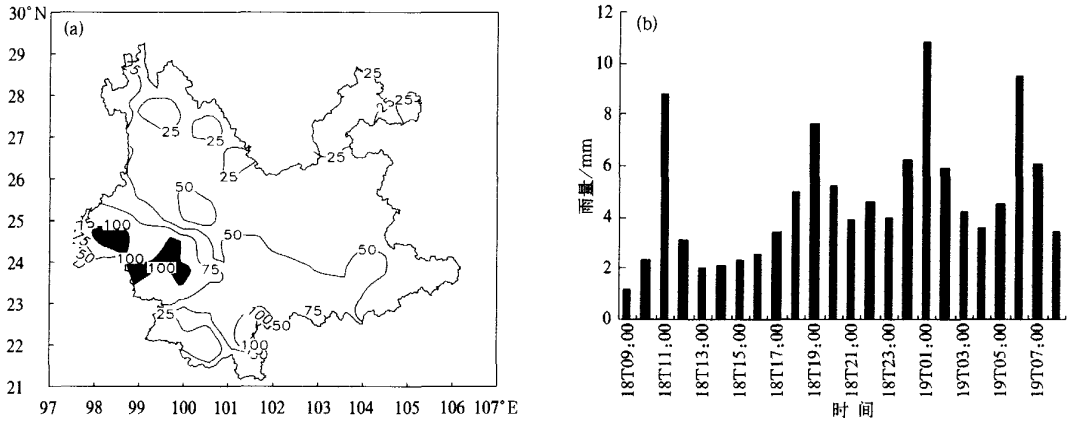


图1 滇西大暴雨过程雨量图(单位: mm)

(a) 2004年5月18日08:00—19日08:00雨量(阴影区为大暴雨区), (b) 大暴雨区域平均逐时雨量演变图

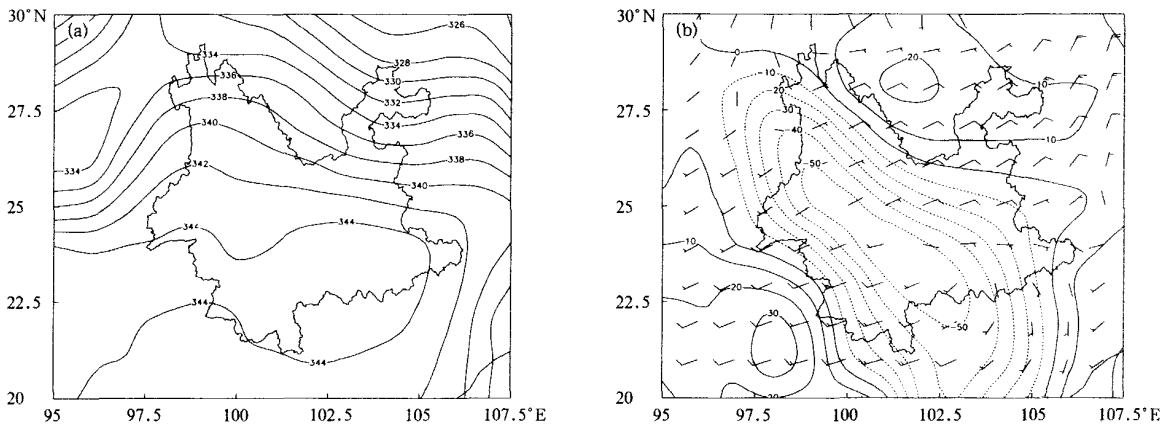


图2 大暴雨过程温湿场及水汽辐合分布图

(a) 18日08:00 700 hPa  $\theta_{0c}$ 分布图(单位: K), (b) 18日20:00 700 hPa 水汽通量散度(单位:  $10^{-10} g \cdot (hPa \cdot s)^{-1} \cdot cm^{-2}$ )及  $u-v$  风场合成图

必要条件。实况表明:大暴雨发生在700 hPa暖湿舌上水汽辐合中心的滇西到滇南一线(图2b)。

### 1.2 不稳定条件

暴雨天气往往都出现在大气层结不稳定区域内。

18日08:00滇西  $K$ 指数高达36~40℃,19日08:00强降雨后降低到32~34℃;滇西  $S_i < 0$ ℃,因而大气环境已具备了发生暴雨的潜在条件。图3a,b分别为18日08:00和20:00的  $K$ 指数分布图。

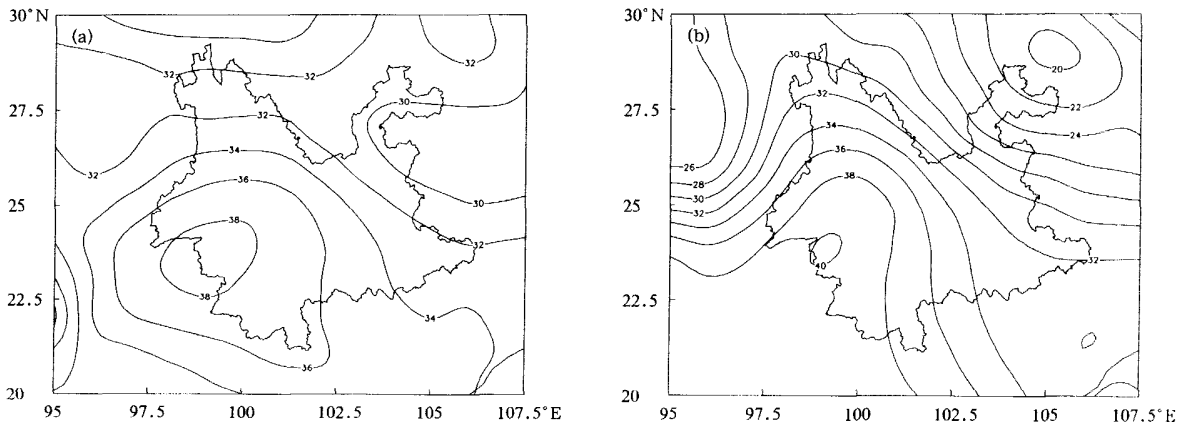


图3 大暴雨过程  $K$ 指数分布图(单位:℃) (a) 18日08:00, (b) 18日20:00

### 1.3 动力条件

将 MICAPS 资料处理为  $1^\circ \times 1^\circ$  的格点资料,计算了 700 hPa 的螺旋度和湿  $Q$  矢量及散度分布,发现滇西大暴雨区正好处于正螺旋度、湿  $Q$  矢量和散度的强辐合区内。

#### 1.3.1 螺旋度

螺旋度能描述大气环境风场气旋沿运动方向的旋转程度和运动强弱,它反映了大气的运动场特征。在  $p$  坐标系下,经简化的局地螺旋度可表达为:  $h = \left(\frac{\partial v}{\partial p}\right)u + \left(\frac{\partial u}{\partial p}\right)v - \left(\frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y}\right)\omega$ 。  $h > 0$ , 则有旋转上升运动;  $h < 0$ , 则有旋转下沉运动。在暴雨的触发机制中,中低层大气的上升运动显得尤为重要。分析 700 hPa 大暴雨过程时间平均的螺旋度分布发现,螺旋度正值区长轴线分布在切变线附近,而滇西大暴雨区处于正螺旋度大值区附近,中心值达  $1.0 \times 10^{-7} \text{ hPa} \cdot \text{s}^{-2}$ ; 分析逐时次(图略)螺旋度分布还发现在过程开始前 17 日 20:00,滇西螺旋度由弱的负值区演变为弱的正值区;过程开始初期 18 日 08:00,螺旋度正值猛增,滇西就处于正螺旋度大值区内,中心强度达  $4 \times 10^{-7} \text{ hPa} \cdot \text{s}^{-2}$ ,而到过程末期 19 日 08:00,螺旋度值降低到  $0.4 \times 10^{-7} \text{ hPa} \cdot \text{s}^{-2}$ 。大暴雨过程期间螺旋度的正值区与切变辐合相一致的分布特征,反映出大暴雨区内存在强的气旋式旋转上升运动,由此而产生绕垂直轴的气旋性旋转上升气流,并经历了由强到弱的演变,这与段旭等<sup>[5]</sup>应用 700 hPa 螺旋度的演变特征分析云南暴雨所得结论相一致。图 4 为 18 日 08:00 和 20:00,19 日 08:00 3 个时次平均的 700 hPa 螺旋度分布图。

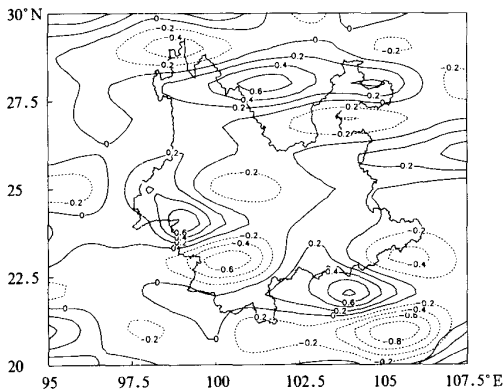


图 4 大暴雨过程平均螺旋度分布图

(单位:  $10^{-7} \text{ hPa} \cdot \text{s}^{-2}$ )

#### 1.3.2 非地转湿 $Q$ 矢量及散度

暴雨是一种中尺度现象,而中尺度系统具有很强的非地转性垂直上升运动,非地转湿  $Q$  矢量及湿  $Q$  散度场是反映非地转上升运动强迫机制的一组物理参数。根据张兴旺的研究<sup>[6]</sup>,在  $p$  坐标下,非地转湿  $Q$  矢量与次级环流有较好的对应关系,即湿  $Q$  矢量方向总是指向气流上升区,而背向气流下沉区。由于湿  $Q$  矢量散度的存在,必然激发次级环流,使大尺度大气进行调整,直到重建新的热成风平衡。文献<sup>[6]</sup>还指出,700 hPa 上湿  $Q$  矢量散度辐合区与强降水落区有很好的对应关系,是强降水落区定性诊断分析的有力工具。图 5 为 18 日 08:00 和 20:00,19 日 08:00 700 hPa 3 个时次平均的  $Q$  矢量及散度分布图。

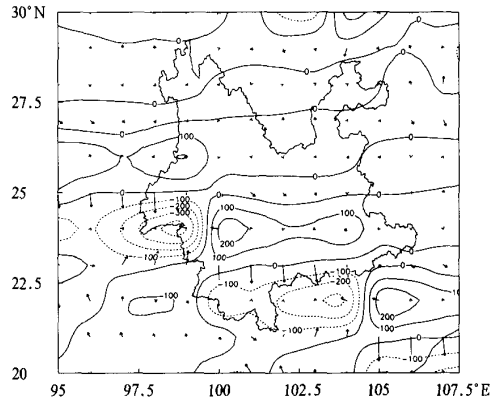


图 5 大暴雨过程平均  $Q$  矢量及平均  $Q$  矢量散度 (单位:  $10^{-17} \text{ hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-3}$ ) 分布图

分析 700 hPa 大暴雨过程时间平均的湿  $Q$  矢量及湿  $Q$  矢量散度场分布发现,滇西大暴雨区处于湿  $Q$  矢量及湿  $Q$  矢量散度辐合区内,湿  $Q$  矢量散度中心值强达  $-400 \times 10^{-17} \text{ hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-3}$ ,辐合区尺度  $250 \text{ km} \times 180 \text{ km}$ ,具有明显的中尺度特征。湿  $Q$  矢量及湿  $Q$  矢量散度辐合区强迫用产生的非地转上升运动,激发出次级环流,为暴雨发生发展提供了有利条件。

综上所述,滇西已具备了强对流及暴雨发生发展的强大动力条件。

## 2 卫星云图分析

由图 1b 可将本次大暴雨大致分为 3 个强降水阶段,第一阶段在 18 日 08:00—11:00,第二阶段在 18 日 15:00—19 日 02:00,第三阶段在 19 日 05:00—08:00。

分析逐时 FY-2 卫星云图发现,18日08:00孟加拉湾风暴中心在 $19^{\circ}\text{N}, 91^{\circ}\text{E}$ 附近,在孟加拉国北部有一条风暴外围螺旋云带,此云带呈顺时针方向旋转东移进入滇西。在大暴雨区发展为 $125\text{ km} \times 125\text{ km}$ 的 $\beta$ 中尺度雨团,此 $\beta$ 中尺度对流系统维持3h,到18日11:00后东移出大暴雨区,造成第一阶段强降水,此阶段冷锋切变云系逐步移向滇西。18日12:00—13:00大暴雨区内云系相对松散,强度也弱些,此时段降水相对较弱。

18日14:00,孟加拉湾风暴北部螺旋云带又一次发展东移进入滇西,14:00—17:00此中尺度雨带发展缓慢,雨带发展缓慢与冷锋切变云系还未并入有关;18:00后,随着冷锋切变云系的西移并入,此中尺度雨带得到强烈发展;20:00雨带覆盖滇西大暴雨区,强中心在盈江到陇川一带。从天气实况图上看到,18日20:00地面冷锋已经快速移到滇西大暴雨区,700 hPa切变线前方的腾冲、思茅吹西南风,切变线后部的丽江、昆明吹强东北风,可见在滇西大暴雨区已经存在强风场辐合,这是中尺度雨带得以迅速发展的重要原因。从18日20:00—18日22:00,此中尺度雨带呈西北—东南向横卧于大暴雨区,18日23:00—19日02:00,此中尺度雨带短轴发展伸长,尺度与长轴相当,又一次形成 $\beta$ 中尺度雨团,范围为 $190\text{ km} \times 200\text{ km}$ ,成为又一个 $\beta$ 中尺度对流系统,此阶段又对应一个强降水高峰。这是第二阶段强降水云图演变特征。

19日02:00后此中尺度雨团东移出大暴雨区,而孟加拉湾风暴主体云系登陆缅甸西海岸,并向大暴雨区移来,期间强降水稍有减弱,到19日05:00—08:00,孟加拉湾风暴主体云系产生的中尺度雨带影响大暴雨区,造成第三阶段强降水。

综上所述,本次滇西大暴雨过程第一阶段强降水是由一个 $\beta$ 中尺度的对流雨团造成;第二阶段强降水也是由一个 $\beta$ 中尺度对流雨团造成,但由于有冷锋切变云系的并入,此 $\beta$ 中尺度雨团较第一阶段雨团范围大、强度更强;第三阶段强降水则由孟加拉湾风暴主体云系的中尺度雨带与冷锋切变云系共同造成,值得注意的是,第三阶段降水云系反而较第二阶段云系稍弱,这可能是前二阶段降水能量释放及第三阶段后半夜降水及温度辐射冷却降低能量的缘故,但总的来看,3个阶段降水强度都比较大。彩图6为18日08:00,18日14:00,19日08:00的卫星云图。

### 3 雷达特征分析

本次滇西大暴雨的雷达特征演变可追溯到过程开始前,18日07:29(彩图7a和7d),与卫星云图上孟加拉湾风暴外围螺旋雨带相对应,在缅甸北部的密支那有一块对流回波移向德宏雷达站(海拔高度2073 m),回波强度为35~44 dBz,雷达扫描半径内分布有多个分散块状单体对流回波;解释VPPI速度场发现,雷达一、二象限为正速度,三、四象限为负速度,虽然零速度线不规则,但可判断呈气旋式流场,且负速度区面积大于正速度区面积,具有辐合型特征<sup>[7]</sup>。因而,在密支那附近的负速度块状回波移动的前方,即雷达观测区内回波将会得到发展。

18日08:30密支那方向移来的回波加强,且分散单体对流回波开始合并,回波面积增大。VPPI图上,零速度线逐渐趋于规则,呈穿过雷达的西北—东南向直线,表明环境风场为西南风,负速度达 $-10.5\text{ m/s}$ ,正速度达 $8.5\text{ m/s}$ ,速度梯度大,风速辐合显著。在腾冲西北侧正速度区内有逆风区生成,逆风区有强度达34 dBz的回波发展。

18日08:46—10:26,从回波演变看,分散单体对流回波不断合并,面积扩大,组织成带状回波,强度在30~40 dBz,零速度线呈穿过雷达的直线,环境风场为稳定的西南风,强回波在正速度区发展,较强的回波与中尺度辐合线及逆风区相对应,而且与风速的辐合密切相关。回波自雷达西北部向东南部发展移过滇西暴雨区,造成第一阶段强降水。

18日11:00—12:00,回波发展不明显;18日12:06回波逐渐弥合为絮状回波。VPPI图上,零速度线仍为直线,但在靠近雷达零线两侧分别出现强度达 $-13\text{ m/s}$ 及 $+12.5\text{ m/s}$ 的速度对,表明有低空急流出现,高度为0.5 km;12:56(彩图7b和7e),回波面积进一步扩大,低空急流加强,正负速度分别达到 $-13.8\text{ m/s}$ 和 $13.4\text{ m/s}$ ,急流高度抬高,达到1.2 km,相当于700 hPa等压面高度;同时腾冲东侧又有逆风区生成。13:00—14:00絮状回波平稳发展,14:06后零速度线曲率开始加大,有“S”型走向,表明暖平流加强,对应回波范围加大,值得注意的是,负速度大值区内回波发展迅速,表明入流气流区扰动增强,上升气流加大。在15:06—17:30絮状回波产生了连续性强降水,在17:40的VPPI图上,零速度线在雷达测站有 $90^{\circ}$ 的折角出现,表明地面冷

锋过境,对应折角附近,单体对流回波发展旺盛。

18日19:20,零速度线曲率又一次增大,风向随高度顺转,低层为暖平流,高层1 km以上为冷平流,这与天气图上700 hPa冷平流西南移动相一致,将有利于对流发展,而且雷达东部又有逆风区生成。18日21:00(彩图7c和7f),逆风区发展,范围扩大,逆风区内回波加强;到03:30零速度线曲率减小趋于拉直,但环境风仍然为高低层一致的强西南风,直到19日02:00絮状回波整体有所减弱,在25~35 dBz,风速减小,这是第二阶段强降水雷达特征。

19日02:06—08:00,速度场演变最明显的就是负速度值不断加大,负速度绝对值明显大于正速度,速度切向梯度保持较大势态,风速辐合导致持续的上升气流,因而回波在05:00—08:00再次发展。另外,入流速度稳定增大,表明孟加拉湾风暴移向雷达。到19日08:00后,絮状回波有所减弱,面积缩小,环境风场偏南分量减小;逆风区、中尺度辐合线、低空西南急流不再频繁出现。实况上降水并未停止,19日08:00—20日08:00,滇西受登陆后减弱的孟加拉湾热带低压影响,仍出现了大雨天气过程。

总体上看,本次强降水以积层混合型回波为主,除了具有对流特征外,还具有典型的层状云降水特征(如彩图8),零度层亮带明显,最大回波强度一般出现在3~4 km高度上,然后向上向下发展。这种现象可能与零度层亮带现象和3~4 km高度上的辐合有关。

由本次大暴雨过程的多普勒雷达特征可见,当孟加拉湾风暴外围螺旋云带移入滇西辐合区内,降水回波发展迅速,回波面积增大,强度增强,以混合型降水回波特征为主,表现为连续性强降水,由于降水时间长,导致过程雨量大,其间锋面及反复交替出现的逆风区、中尺度辐合线、低空急流等多种中小尺度系统是本次大暴雨过程的重要雷达特征。

## 4 小 结

1) 孟加拉湾风暴与冷空气共同作用是这次滇

西大暴雨发生的天气尺度背景。

2) 滇西高能高湿的不稳定大气层结,充沛的水汽输送和辐合,强烈的上升运动为这次大暴雨提供了有利的环境条件。

3) 大暴雨发生在700 hPa水汽辐合中心及700 hPa螺旋度正值区和湿 $Q$ 矢量散度辐合中心区域,对暴雨的预报有较高的参考价值。

4) 孟加拉湾风暴外围螺旋云系移入辐合区内得到强烈发展,两次 $\beta$ 中尺度雨团及一次 $\beta$ 中尺度雨带活动是造成这次大暴雨的卫星云图中尺度系统。

5) 在多普勒雷达上,这次滇西大暴雨表现为混合型降水特征,在层状云中镶嵌着对流云,回波强度分布在空间上不均匀。零度层亮带明显,最大回波强度一般出现在3~4 km高度上。对流回波分布比较复杂,但大部分以积层絮状回波为主,强度在30~44 dBz,降水时间长,连续的强降水导致过程雨量较大。多普勒速度场上,锋面及中尺度辐合线、逆风区、低空急流等中小尺度系统活动是这次大暴雨的重要多普勒雷达特征。

## 参 考 文 献

- [1] 黄文根,邓北胜,熊廷南.一次台风暴雨的初步分析.应用气象学报,1997,8(2):247-251.
- [2] 陈淑琴,黄辉,邵春海.南海登陆热带气旋对长江三角洲地区降水的影响.应用气象学报,2004,15(6):688-695.
- [3] 麻素红,瞿安祥,张怡.台风路径数值预报模式的并行化及路径预报误差分析.应用气象学报,2004,15(3):322-328.
- [4] 魏锦成,吴陈锋,杨奇志.热带气旋北冕暴雨多普勒雷达分析.气象,2004,30(11):32-34.
- [5] 段旭,李英,许美玲,等.低纬高原地区中尺度天气分析与预报.北京:气象出版社,2004:105-108.
- [6] 张兴旺.湿矢量表达式及其应用.气象,1998,24(8):3-7.
- [7] 张培昌,杜秉玉,戴铁丕.雷达气象学.北京:气象出版社,2001:280-493.

## Mesoscale Analysis on a Heavy Rain Associated with a Bengal Bay Storm and Cold Air in West Yunnan

Lu Yabin<sup>1)</sup> Zhang Tengfei<sup>1)</sup> Xu Balin<sup>2)</sup> Yang Ming<sup>1)</sup> Zhou Goulian<sup>1)</sup>  
Suo Miaoqing<sup>3)</sup> Cun Canqiong<sup>4)</sup>

<sup>1)</sup> (Yunnan Meteorological Observatory, Kunming 650034)

<sup>2)</sup> (Yunnan Meteorological Equipment Center, Kunming 650034)

<sup>3)</sup> (Simao Meteorological Bureau, Yunnan Province, Simao 665000)

<sup>4)</sup> (Dehong Meteorological Bureau, Yunnan Province, Luxi 678400)

### Abstract

A severe tropical storm develops over the Bengal Bay at the mid May, 2004. Jointly affected by the Bengal Bay storm and cold air and wind shear, a heavy rainstorm which lasts 3 days hits Yunan Province with the rainband stretching mainly from the west to the south. From 08:00(BT) May 18 to 08:00(BT) May 19, a severe rainfall occurs in west Yunnan with the centers in Baoshan, Dehong and Lincang. 24-hour rainfall is over 100 mm in 6 county stations, the rainfall center is at Longling of Baoshan with the 24-hour rainfall reaching 124.3 mm. It is the first time that such a concentrated heavy rain occurs in a circular area of 180 km radius in Yunan.

The tropical storm is one of the important weather systems which cause severe rainstorm in China. There are a lot of scientific investigations on the occurrence and evolution of the tropical storm (typhoon) over the west Pacific Ocean. Thus the forecasting ability on the tropical storm (typhoon) over the west Pacific Ocean has been improved. However, researches on the tropical storms originated in the Bengal Bay are still few. In fact, the storm of the Bengal Bay has significant impacts on the rainstorm in the southwest China. To explore the physical mechanism of the heavy rain in west Yunnan occurring on May 18, 2004, the MICAPS products, FY-2 satellite images and Dehong CINRAD-CC Doppler radar volume scan data are taken into account for the investigations. Moisture flux divergence,  $K$  index,  $S_i$  index and  $Q$  vector divergence show that the synoptic scale affecting systems are the storm over the Bengal Bay and the southward cold front shear. The heavy rain occurs in the favorable environment field where the centers of water vapor convergence with high instability energy and high wet, positive helicity region at 700 hPa level and convergence area of wet- $Q$  vector are located. Also, the satellite images present that the evolutions of some meso- $\beta$  scale convective systems are the key of the heavy storm. And Doppler tracking observations give the facts that the echoes are mixed wadding rain echo with intensity between 30 ~ 44 dBz, the direct factors of the process are the meso- and small-scale systems such as frequent inverse wind, low level jet and meso-scale convergence line.

**Key words:** heavy rain; diagnostic analysis; satellite image; feature of Doppler radar echo

# 鲁亚斌等：一次孟加拉湾风暴和冷空气影响下滇西大暴雨中尺度分析

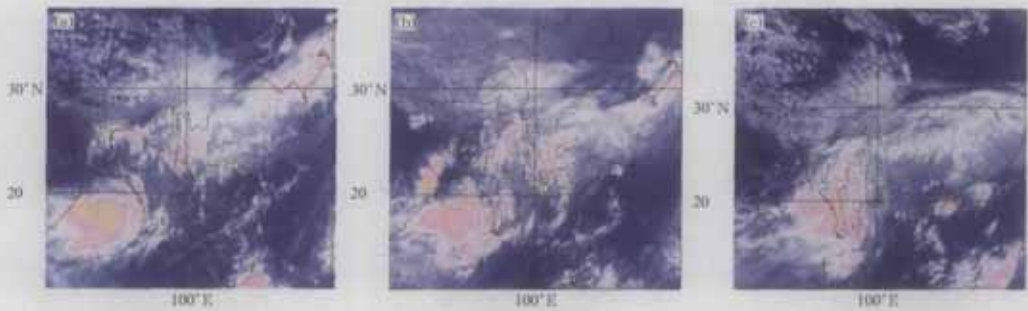


图6 2004年5月18—19日部分时刻FY-2红外云图  
(a)18日08:00, (b)18日14:00, (c)19日08:00

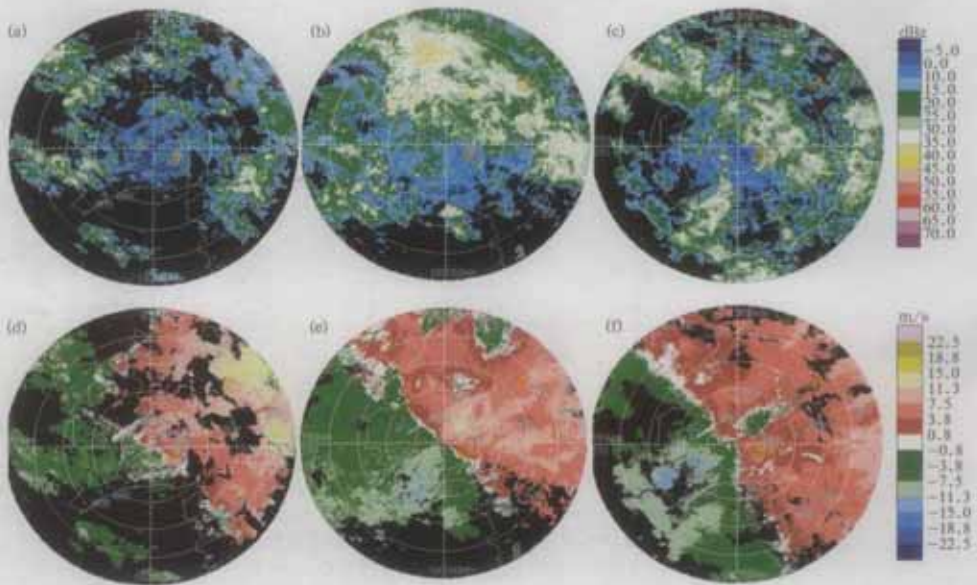


图7 2004年5月18日德宏雷达反射率因子 (a) 07:34, 1.5°仰角, (b) 12:56, 1.0°仰角, (c) 21:00, 0.7°仰角  
和径向速度 (d) 07:34, 1.5°仰角, (e) 12:56, 1.0°仰角, (f) 21:00, 0.7°仰角图 (距离每圈30 km)

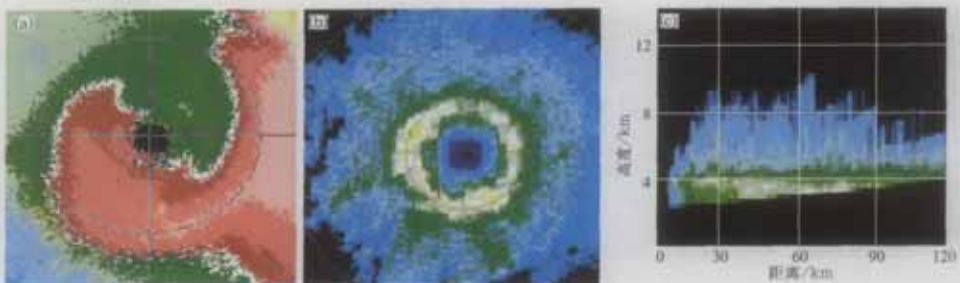


图8 2004年5月18日德宏雷达回波图 (色标同图7, 距离每圈30 km)  
(a) 12:56径向速度图, 3.4°仰角, (b) 12:56反射率因子图, 3.4°仰角, (c) 12:00 RHI剖面图, 方位角为245°