

# 云南一次切变线上中尺度低涡扰动的结构分析<sup>①</sup>

何 华<sup>1</sup> 肖子牛<sup>2</sup> 姚秀萍<sup>3</sup> 海云莎<sup>1</sup> 施建国<sup>4</sup>

(1. 云南省气象台, 昆明 650034; 2. 云南省气象局;  
3. 中国气象局培训中心; 4. 云南省气象科学研究所)

## 提 要

利用  $\eta$  中尺度数值模式模拟的时空高分辨输出、常规资料、GMS 红外云图及  $T_{BB}$  资料, 对 2002 年 6 月 25 日切变线上中- $\alpha$  尺度低涡扰动的结构、形成过程及冷空气来源进行研究, 结果表明, 低涡环流的尺度属于中- $\alpha$  尺度, 持续时间 7 小时左右, 低涡成熟阶段, 700hPa 正涡度中心与低涡环流中心相重合, 低空急流及强辐合中心位于低涡的东南象限; 低涡环流由三股气流构成; 低涡区上空存在超强散度柱、倾斜涡柱、深厚的上升运动区及特强垂直上升运动, 超强散度柱与特强垂直上升运动互耦, 强辐合、辐散中心发生在南、北风辐合、辐散且有强的  $v$  分量垂直梯度处, 低层正涡度中心的上方, 存在一负涡度中心; 最大的水汽辐合位于 700hPa 及 550hPa; 低涡区冷空气来自 500hPa 的滇缅高压; 大暴雨中心位于低涡中心的东侧。

**关键词:** 强降水 低涡扰动 数值模拟 结构特征

## 引 言

2002 年 6 月 24 日 20 时~25 日 20 时(北京时, 以下相同)受 500hPa 滇缅高压与西太平洋副热带高压之间的辐合区及 700hPa 低涡切变的共同影响, 云南出现了一次全省性的大一暴雨天气过程。产生暴雨和强对流天气的实体是中尺度对流性天气系统, 由于常规资料的时空分辨率低, 缺少中尺度信息, 难以对一些中小尺度对流系统进行细致的分析, 因此对切变上中- $\alpha$  尺度低涡的结构、发生、发展和演变情况还不十分清楚, 尚缺少深入的研究。近年来随着中尺度数值模式和计算机能力的发展, 开始利用中尺度数值模式的时空高分辨输出对一些中小尺度天气系统进行研究。本文在模式成功地模拟出 2002 年 6 月 25 日云南的强降水过程及中- $\alpha$  尺度

低涡扰动的基础上, 利用模式资料、常规资料、GMS 红外云图及  $T_{BB}$  资料, 对这次切变线上中- $\alpha$  尺度低涡扰动过程进行深入分析, 揭示低涡附近主要特征量的垂直分布、水平配置、低涡区冷空气来源, 大暴雨落区。本文虽然只分析了一个两高辐合形势下低涡切变的个例, 但在低纬高原地区还是很有代表性的。

## 1 大尺度背景场及模式简介

2002 年 6 月 24 日 20 时~25 日 20 时云南出现了一次全省性的大一暴雨天气过程, 降水主要出现在 25 日 02~14 时之间。2002 年 6 月 25 日 08 时 500hPa 上青藏高原东南部到云南西北部为一 5880gpm 的高压环流(滇缅高压), 西太平洋副热带高压 5880gpm 线的西部脊线位于云南东部, 两高压之间在

<sup>①</sup> 由云南省“十五”攻关项目 2001NG43 及国家自然科学基金(NSFC)40205008 共同资助。

云南的东川、楚雄、潞西附近形成一东北—西南走向的辐合区,孟加拉湾为一低压槽区。700hPa上,在云南的丽江、昆明、思茅、腾冲、丽江为一3120gpm的低压环流,低压中心位于楚雄附近;在大理、楚雄、蒙自为一西北—东南向的切变线,云南大部地区从700~500hPa均处于有利于强对流天气发生、发展的环境中。本次大—暴雨过程与500hPa两高辐合区、700hPa低涡切变线以及沿切变线相继生成和强烈发展的中- $\alpha$ 尺度对流系统(M<sub>α</sub>CS)密切相关。文献[1]指出,造成云南全省性大雨和暴雨过程的影响系统主要有三种类型:即切变型、台风低压型、两高辐合型。文献[2]指出,切变线主要是与低涡、西风槽或地面冷锋结合造成低纬高原地区的大—暴雨天气,单一的切变线也可产生强烈天气,但影响范围不大,持续时间不长。因此对两高辐合形势下切变线上低涡扰动的结构进行研究是很有必要的。

由于云南地处低纬高原地区,全省90%的台站的海拔高度在1000m以上,最高的达到3500m以上,因此选700hPa高度层作为云南的对流层低层。本文选用采用非静力平衡方案,充分考虑青藏高原大地形影响的 $\eta$ 中尺度数值模式对2002年6月25日云南出现的大—暴雨过程进行数值模拟,模拟范围15.0~65.0°N,85.0~135°E,模式垂直方向为17层,积分长度72小时,积分步长1小时,物理量分辨率为0.5°×0.5°,降水量分辨率为0.25°×0.25°。用2002年6月24日08时高空及地面观测资料为模式提供初始场和边界条件,积分72小时,在模式积分过程中,采用12小时间隔的高空观测资料和3小时间隔的地面观测资料进行客观分析,将所得的分析场进行四维同化,对预报量进行修正,使之向实测值逼近,产生一个逼真的时空高分辨的分析结果。

## 2 实况和模拟对比分析

### 2.1 低涡的比较

图1是2002年6月24日20时、25日08时及25日20时云南上空700hPa模拟及实况流场,由图1可见,24日20时(图1a、b),云南北部有一辐合线,在24~26°N、103°E附近即未来的大暴雨区有南风的辐合;25日08时(图1c、d),云南为一低涡环流控制,

低涡中心位于滇中的楚雄附近;与图1d相对应的700hPa位势高度场是一水平尺度约300km的3120gpm的低涡环流(图略);25日20时(图1e、f),云南上空的低涡环流减弱消失,流场由气旋式流入完全转为气旋式流出,滇中由强辐合区变为强辐散区;可见模拟流场与实况流场非常相似。

### 2.2 降水比较

图2是2002年6月24日20时~25日20时的12小时、24小时雨量≥25mm实况及模拟雨量分布图;比较图2a、b两图(12小时降水),模拟的低涡中心附近(滇中)的大雨带走向及暴雨中心与实况较一致,滇西的大雨带比实况略偏南,强度偏强,滇东北的降水比实况偏强。对图2c云南24日20时至25日20时的24小时降水分析表明,大雨主要出现在滇中及以东以西的地区,暴雨中心分别位于滇中及滇西,最大的降水出现在低涡中心的东侧;比较图2c、d两图(24小时降水),模拟的低涡中心附近(滇中)的大雨带走向及暴雨中心与实况较一致;就整个大雨带而言,雨带走向与实况相似,但范围比实况略小,暴雨的范围比实况偏大,滇东北的降水报得比实况偏强。通过对12小时及24小时实况降水与模拟降水的对比分析,本次模拟的强降水分布与实况基本相似。

通过低涡及降水的实况与模拟的对比分析,可知, $\eta$ 模式成功地模拟出这次两高辐合、低涡切变环流形势下700hPa云南的中- $\alpha$ 尺度低涡扰动过程及强降水过程,为我们进一步利用模拟结果对这次切变线上中- $\alpha$ 尺度低涡扰动过程进行深入分析,提供了可靠的依据。

### 3 中- $\alpha$ 尺度低涡的形成过程

利用2002年6月24日20时~25日20时时间间隔为1小时的 $T_{bb}$ 及GMS红外云图资料,对造成这次强降水过程的中尺度对流系统的尺度、生消过程进行分析,以检验模拟结果的真实性。按照文献[3]对M<sub>α</sub>CS定义的标准,依次对该过程逐时GMS红外云图和 $T_{bb}$ 等值线图进行分析指出(图略),造成这次强降水过程的系统属于中- $\alpha$ 尺度对流系统。

由每小时一张的700、500hPa流场模拟图可见(图略),25日01~03时,图1a中,云

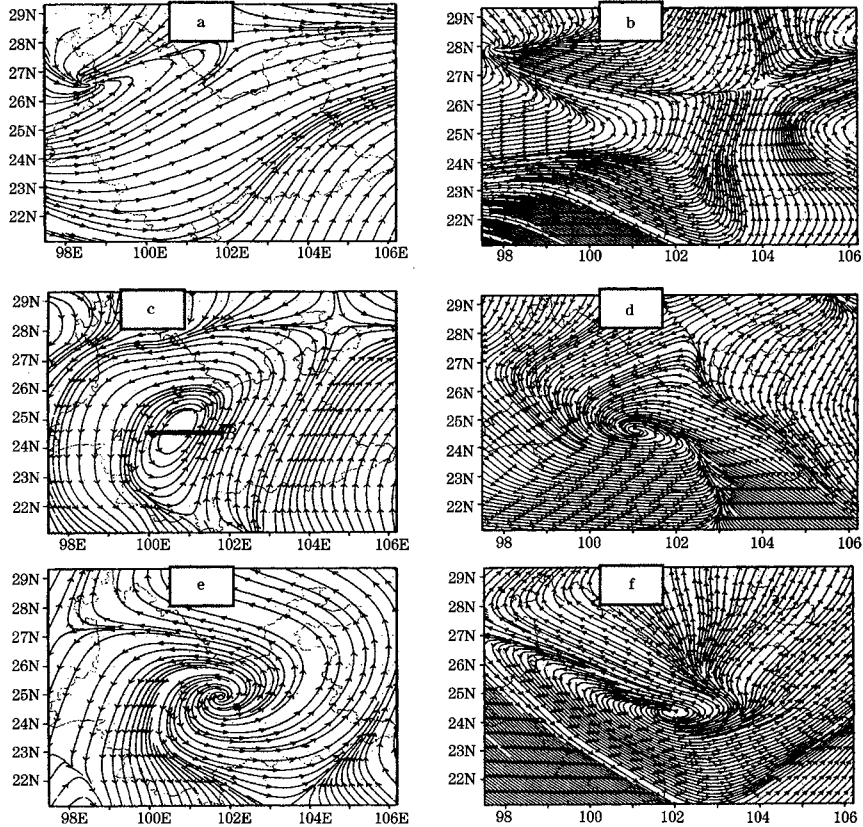


图1 模拟(a,c,e)和实况(b,d,f)的700hPa流场分布

图 a,b 为 24 日 20 时, c,d 为 25 日 08 时, e,f 为 25 日 20 时, c 中 AB 线段为低涡中心沿纬向的剖面

南北部的辐合线(切变线)由于冷空气的加强,切变线加强南压到丽江—昆明附近,由于500hPa滇缅高压引导偏北冷气流南下,西太平洋副热带高压引导偏南暖湿气流北上,形成极强的气旋性切变叠置于低层辐合线上,促使700hPa辐合线上气流的气旋式旋转开始加大,导致气旋性涡旋的产生;于25日04时700hPa辐合线上的气旋性涡旋在辐合区内得以加强发展,在滇中形成一低涡环流;25日05时,低涡环流进一步发展,范围扩大,水平尺度约300km,低涡中心位于楚雄附近;25日08时低涡中心位置少变,强度达到了最强,控制了云南的中部地区(见图1d);25日11时低涡中心附近的气旋式辐合开始减弱;25日15时700hPa云南上空流场开始出现气旋式流出,25日20时云南上空流场完全转为气旋式流出,低涡环流从形成到减弱消散。从流场上看,低涡附近流线的气旋式旋转始终没变,只是流线由气旋式流入变为气

旋式流出,整个过程大约经历了7小时,与用 $T_{BB}$ 等值线图分析出的中- $\alpha$ 尺度系统的生消过程大体相似。

#### 4 低涡区主要动力特征量的垂直分布及冷空气来源

##### 4.1 $u$ 、 $v$ 分量的分布及冷空气来源

为揭示成熟阶段低涡区上空主要动力特征量、水汽的垂直分布特点以及动力特征量之间的内在联系,图3给出了模拟的2002年6月25日08时700hPa沿图1c中AB剖线上的风分量 $u$ 、 $v$ 、散度 $D$ 、相对涡度 $\zeta$ 、垂直速度 $\omega$ 、水汽通量散度的垂直剖面图。

由图3a、b可见,低涡中心的西侧有一支来自孟加拉湾低压槽前的西南暖湿气流,由低层自西南边出发向东北边倾斜上升到550hPa,由于来自500hPa滇缅高压东侧的冷空气的侵入,该气流转为西北气流且垂直向上伸展到400hPa,400hPa以上又转为东南风;在低涡中心的东侧,有一支来自西太平

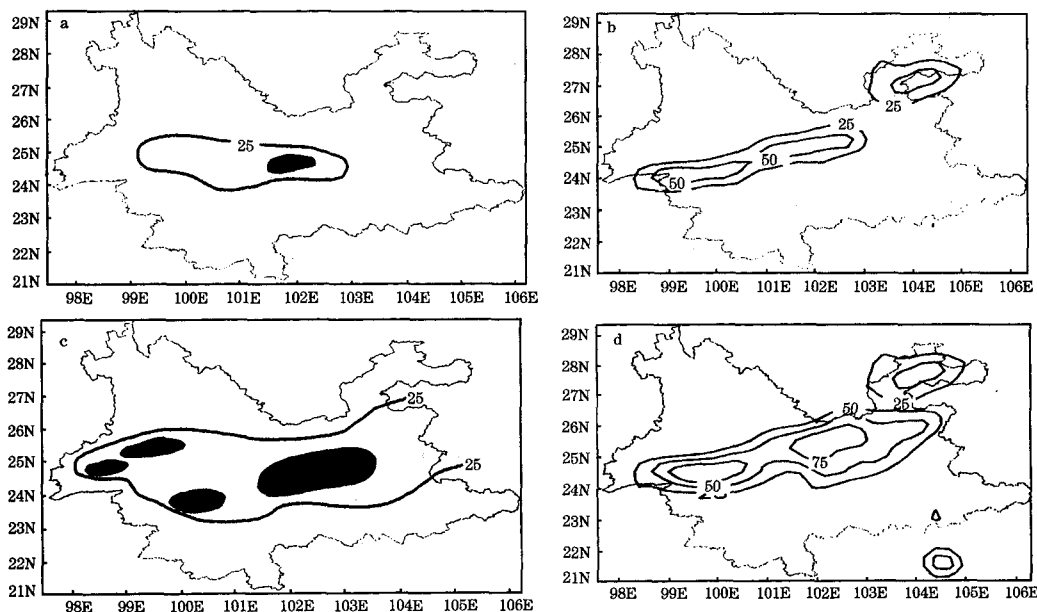


图2 实况和模拟12小时及24小时雨量(等值线间隔25mm)

a,c分别为2002年6月24日20时~25日08时及24日20时~25日20时云南省实况雨量,阴影区为雨量 $\geq 50\text{mm}$ 的暴雨区,b,d分别为模拟12小时(对应2002年6月24日20时~25日08时)及24小时(对应24日20时~25日20时)模拟雨量。

洋副热带高压西侧的东南气流,由低层自东南边向西北边倾斜伸展到350hPa滑行于西侧的西北气流之上,可见,低涡上空由三股气流构成(既西南气流、西北气流、东南气流)。550~600hPa有南北风辐合,350~300hPa有南北风辐散,在南北风辐合及辐散处存在较大的 $v$ 分量垂直梯度。由于低涡区上空存在着深厚的风切变层(风切变线附近风向辐合最强烈,存在着强烈的上升气流)、不稳定层结(来自500hPa滇缅高压东侧的冷空气位于低层暖湿气流之上,在700~400hPa之间形成了上冷下暖的不稳定层结)及斜压不稳定性(冷空气的侵入加大了低涡内部的斜压性,由斜压不稳定使扰动增幅),所以该低涡能发展成中- $\alpha$ 尺度低涡。

#### 4.2 涡度、散度及水汽通量散度的分布

由图3c可见,低涡上空存在一超强散度柱,450hPa以下为辐合区,以上为辐散区; $-60 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 强辐合中心位于南、北风辐合处, $80 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 强辐散中心位于南、北风辐散处(图3b)。由图3d可见,低涡区上空有一东北-西南走向的倾斜涡柱,涡柱走向与东、西风切变线走向相似(图3a);低层正涡度中心上方有一范围与图3b中北风范围相

当的负涡度中心,这是低涡西侧(550~350hPa)的西北气流产生下沉气流的反映,这支冷空气一直流到与南来的气流辐合,进一步加强上升支中的气流,由于低涡西侧有下沉气流,因而对上升支气流的西侧有所抑制,这可能是涡柱随高度向东北方向倾斜的原因所在。

由图3f可见,450hPa以下为水汽辐合区, $-50 \times 10^{-7} \text{ g} \cdot (\text{s} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{hPa})^{-1}$ 两个大的水汽辐合中心分别位于700hPa及550hPa。

#### 4.3 垂直速度的分布及特强垂直上升运动与超强散度柱的耦合发展

由图3e可见,低涡区上空有一深厚的上升运动区及特强垂直上升运动,强达 $16 \times 10^{-3} \text{ hPa} \cdot \text{ s}^{-1}$ 的垂直上升运动出现在500~400hPa之间。文献[4]指出,要有强而持续的上升运动,单有低层的辐合流场是不够的,还必须在高层有一个辐散流场而且其辐散量要大于或等于低层的辐合量(由图3c、d可见,本次低涡过程,高空辐散强于低空辐合);可见高层大气的辐散是维持和加强低层辐合上升运动不可缺少的条件,而上升运动的强弱一定程度上又取决于散度的大小,将连续方程由大气层顶( $P=0$ )至 $P$ 层积分得:

$$\omega_p = \omega_0 - \int_0^p \left( \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) dp \quad (1)$$

因为在大气层顶  $\omega_0 = 0$  所以式(1)可以写成:

$$\omega_p = - \int_0^p \left( \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) dp \quad (2)$$

由式(2)可知,  $P$  层的垂直速度可由  $P$  层以上整层的水平散度之和来决定, 当水平散度之和为辐散时, 即  $\left( \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) > 0$  时, 则  $P$  层以下的空气必须通过  $P$  层向上补充, 因而在  $P$  层有上升运动,  $\omega_p < 0$ , 即高层有“抽

气”作用。当水平散度之和为辐合时, 则  $P$  层以上的空气必须通过  $P$  层向下输送, 因而在  $P$  层有下沉运动,  $\omega_p > 0$ 。垂直运动与低空辐合和高空辐散是密切相关的, 强辐散中心的“抽吸作用”对加强低层辐合和垂直上升运动起到了十分重要的作用。同时垂直上升运动所引起的水汽、热量、动量、涡度等的垂直输送又会引起大气柱中的涡度、散度等物理量的改变。可见低涡区上空如此深厚的强上升运动及超强散度柱的出现是两者互耦发展的结果。

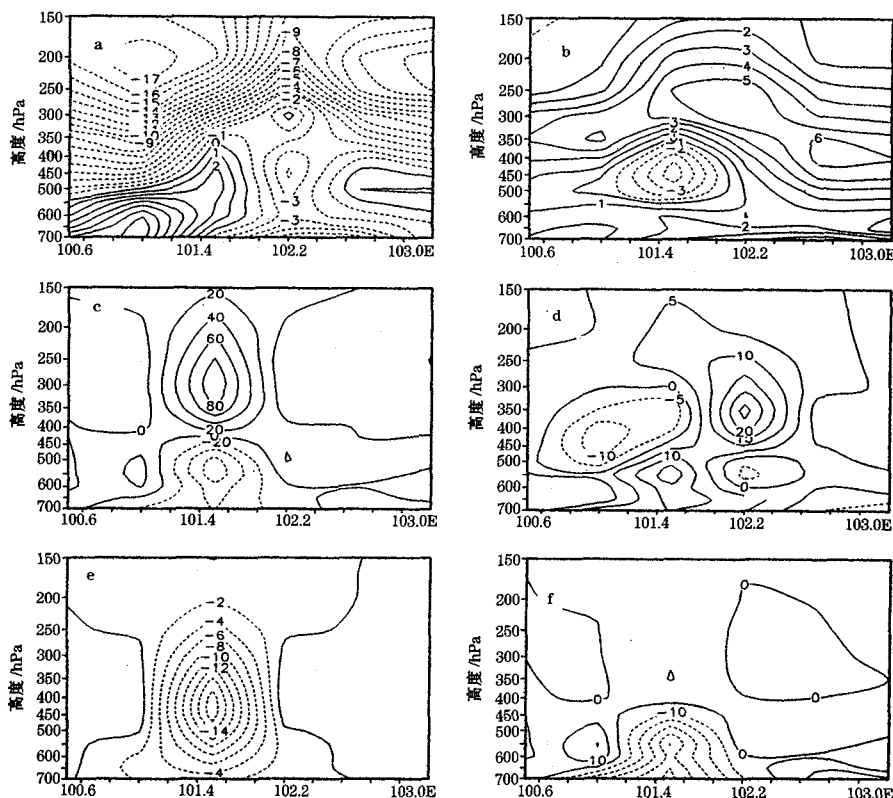


图3 模拟的沿图1c中AB线的低涡(2002年6月25日08时)附近主要特征量垂直剖面  
 a. 西风分量/ $m \cdot s^{-1}$ ; b. 南风分量/ $m \cdot s^{-1}$ ; c. 散度/ $10^{-5} s^{-1}$ ; d. 相对涡度/ $\times 10^{-5} s^{-1}$ ;  
 e. 垂直速度/ $\times 10^{-3} hPa \cdot s^{-1}$ ; f. 水汽通量散度/ $g \cdot (s \cdot cm^2 \cdot hPa)^{-1}$

### 5 低涡附近主要特征的水平分布

为了解上述垂直剖面所揭示的主要特征相对于低涡中心的水平分布特点, 图4给出2002年6月25日08时700hPa低空急流、正涡度中心、强辐合中心相对于700hPa低涡中心的位置分布, 由图4可见, 正涡度中心与

低涡中心相重合; 强辐合中心位于低涡的东南象限, 距低涡中心约200km; 低空急流位于低涡的东南象限, 距低涡中心约300km, 与文献[5]的局地低涡相应特征量的分布相同。

### 6 结论

利用2002年6月25日受500hPa两高

辐合区及 700hPa 低涡切变的共同影响,云南出现的一次全省性大—暴雨天气过程的中尺度数值模式模拟的时空高分辨输出、常规资料、GMS 红外云图及  $T_{BB}$  资料,对这次切变线上中- $\alpha$  尺度低涡扰动的结构、形成过程及冷空气来源进行深入分析表明:

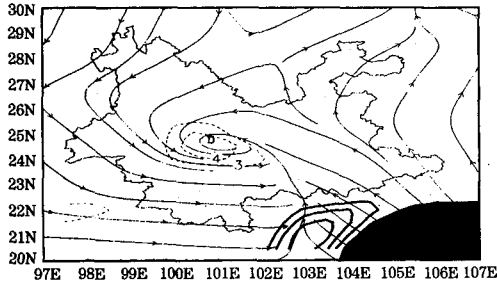


图4 2002年6月25日08时700hPa低涡附近主要特征量的水平分布

D 为低涡中心;箭头线为流线,短虚线为涡度区(单位:  $\times 10^{-5} s^{-1}$ , 间隔 1);实线为散度  $< -3.0 \times 10^{-5} s^{-1}$  的辐合区,间隔 1;阴影区为风速  $\geq 12 m \cdot s^{-1}$  低空急流

水平方向:低涡环流的尺度属于中- $\alpha$  尺度,持续时间 7 小时左右,700hPa 正涡度中心与低涡环流中心相重合,低空急流及强辐合中心位于低涡的东南象限;大暴雨位于低

涡中心的东侧。

垂直方向:低涡环流上空由三股气流构成,强辐合、辐散中心发生在南、北风辐合、辐散且有强  $v$  分量垂直梯度处;低涡区上空存在超强散度柱、倾斜涡柱、深厚的上升运动区及特强垂直上升运动,超强散度柱与特强垂直上升运动互耦;无辐散层位于 425hPa;倾斜涡柱的走向与东、西风的风向切变走向相似;冷空气的侵入使得低层正涡度中心上方,存在一负涡度中心;最大的水汽辐合位于 700hPa 及 550hPa;低涡区冷空气来自 500hPa 的滇缅高压东部。

参考文献

- 1 何华,孙绩华.云南冷锋切变大暴雨过程的环流及水汽输送特征.气象,2003,29(4):48~52.
- 2 秦剑,琚建华,解明恩.川滇切变线.低纬高原天气气候.北京:气象出版社,1997:67~70.
- 3 陶祖钰,王洪庆,王旭等.1995年中国的中- $\alpha$  尺度对流系统.气象学报,1998,56(2):166~177.
- 4 朱乾根,林锦瑞,寿绍文.暴雨分析.天气学原理和方法.北京:气象出版社,1983:246~250.
- 5 高坤,徐亚梅.1999年6月下旬长江中下游梅雨锋局地涡扰动的结构研究.大气科学,2001,25(6):740~755.

Structure Analysis of Meso- $\alpha$ -Scale Low Vortices on Shear Line in Yunnan

He Hua<sup>1</sup> Xiao Ziniu<sup>2</sup> Yao Xiuping<sup>3</sup> Hai Yunsha<sup>1</sup> Shi Jianguo<sup>4</sup>

(1. Yunnan Meteorological Observatory, Kunming 650034; 2. Yunnan Meteorological Bureau; 3. Training Center, CMA; 4. Yunnan Institute of Meteorological Science)

Abstract

The outputs of the  $\eta$  mesoscale numerical simulation, the observational data, the infrared cloud image from GMS and the  $T_{BB}$  data are employed to study the structure and formation of a low vortex on the shear line and the sources of the cold air. The results show that the low vortex in this process belongs to the meso- $\alpha$  scale, with 7-hour duration. In the mature phase, the center of the positive vorticity is coincident with that of the vortex, and the 700hPa low-level jet and the strong convergent center located in its southeast quadrant. The vortex circulation is made up of three currents, with the super-strong divergence column, the vertical vorticity column, and the deep ascending motion region above. The deep ascending motion is coupled with the strong divergence. The centers of the strong convergence (divergence) emerged at the positions of the convergence (divergence) of southerly and northerly, accompanying with the strong vertical shear of meridional wind. In addition, there is a negative vorticity center over the low-level positive vorticity center. It is also found that the maximum vapor convergence located at 700hPa and 550hPa and that the cold air is mainly derived from the high over Yunnan to Burma at the 500hPa.

**Key Words:** heavy rain Meso- $\alpha$ -scale low vortex numerical simulation structure