

# 梅雨锋云带内 – 中尺度对流系统 周边水汽风的分析

刘启汉

(香港科技大学海岸与大气研究中心, 香港)

陈受钧

(暴雨监测与预测国家重点实验室, 北京大学大气科学系, 北京, 100871)

## 摘 要

应用准静止卫星水汽图像导出的风(简称为水汽风)分析东亚梅雨锋云带内中尺度对流系统(MCS)在对流层上层的流出通道。结果表明梅雨锋云带内 MCS 有二类流出通道。一类 MCS 在对流层上层呈现为一个中尺度反气旋。MCS 的东部有一支中尺度高空急流, 这支中尺度高空急流向东流出后转向南, 流入 20°N 附近的南亚东风急流内, 是 MCS 在对流层上层的主要流出通道。另一类 MCS 发生在中纬度西风急流的南侧。中纬度西风与 MCS 南部的偏东北风构成一个反气旋环流带。MCS 前方的流出通道(中尺度高空急流)是中纬度西风急流的一个中尺度分支。梅雨锋云带内垂直方向水平风速切变小于  $1 \text{ m/s}$  ( $100 \text{ hPa}$ ), 垂直方向不通风有利于云带内 MCS 的维持。初步分析验证了以前数值模拟得到的中尺度高空急流及其流出通道。

关键词: 水汽风, 梅雨锋云带, 中尺度对流系统。

## 1 引 言

中国夏半年东部地区的暴雨大部分是由梅雨锋云带内的中尺度对流系统(以下简称为: MCS)产生的。这类 MCS 在对流层上层的流出通道是产生和维持强烈的上升运动和暴雨的一个重要因子。气象学者最早认为: 中纬度高空西风急流入口区右侧的辐散场是产生暴雨区内强上升运动的一个机理(例如, 见丁一汇<sup>[1]</sup>的综述), 但是具体的流出通道并不清楚。20 世纪 80 年代, 开始注意到这类 MCS 在对流层上层为偏东北气流, 其流出通道是向南的, 注入位于 20°N 附近南亚高空东风急流的入口区, 从而构成一个在 MCS 中上升, 南面下沉的二级间接环流<sup>[2~5]</sup>。应用中尺度数值模式模拟江淮流域、华南和黄海地区梅雨云带内的 MCS 时, 在对流层上层模拟出一个中尺度高压和一支中尺度高空急流(mULJ)<sup>[6~9]</sup>。这支 mULJ 位于 MCS 的东侧, 是主要的高空流出通道。轨迹分析表明, mULJ 向东流

出后转向南, 汇入位于副热带的南亚东风急流。东亚大陆上空的常规探空资料的空间距离在 300 km 以上, 不足以给出梅雨云带及其 MCS 在对流层上层的中尺度风场, 因此上述数值模拟的结果尚需要更多的观测资料的支持。

Velden 等<sup>[10]</sup>开发了一个应用准静止卫星水汽图像导出风场(以下简称为: 水汽风)的算法。根据间隔 30 min 连续 3 张准静止卫星水汽图, 标记水汽特征(如水汽梯度)点, 由辐射亮温确定水汽特征点高度, 然后进行风的计算和编辑。这个系统应用一个背景风场<sup>[11]</sup>(美国海军全球预报系统, NOGAPS)来帮助决定连续的水汽图像中水汽特征标记点的位置, 从而导出水汽风。详细的方法可参阅文献<sup>[10]</sup>。应该指出, 由水汽图像中的特征标记点导出的水汽风与云迹风不同, 不是单一高度上的风, 它代表垂直方向按卫星水汽频道加权平均后在一个气层中的平均风。在对流层上层湿度较高的地方, 这个层次的厚度通常为 200 hPa 左右。对流层上层湿度相对高

的区域通常有较厚的卷云或对流云的云砧,也是梅雨云带的高空流出通道。在梅雨锋云带附近,水汽风的空间分辨率远大于云迹风,达 150 km 左右(图 1b),因此适用于表征对流层上层中尺度的风场。此外,在高空测风记录稀少的洋面上,水汽风提供的稠密资料有助于分析海洋上的梅雨锋云带。

本文应用美国威斯康辛大学卫星气象联合研究所(CIMSS)的水汽风产品(<http://cimss.ssec.wisc.edu>)对东亚梅雨锋云带及其 MCS 周边的水汽风作初步分析,特别注意高空的流出通道,验证以前数值模拟的结果。

## 2 水汽风分析

### 2.1 黄海—长江流域梅雨云带

图 1a 是 2002 年 6 月 22 日 0600(UTC)的红外卫星云图。一个典型的锋面气旋云系位于日本北海道以东约 1500 km 的洋面上,其中的冷锋云系东北—西南向延伸到日本以南洋面(30 N, 140 E)。自 140 E 以西,东北—西南向的冷锋云系转变成一条沿 30 N, 东—西向的梅雨锋云带,一直延伸至 105 E。在梅雨锋云带中包含 3 个 MCS(图 1a, 以下分别表示为 MCS-A, MCS-B 和 MCS-C), 分别位于长江中游、上游和日本九州以南的东海海面上(30 N, 130 E)。MCS-A 的水平尺度约为 500 km, 其位置和范围与 2002 年 6 月 22 日 00~06 时(UTC, 下文中相同)的 6 h 降水量分布(图 2)很一致。驻马店市(33 N, 114 E)记录到的 6 h 降水量达到 67 mm。MCS-B 中的对流云团 B<sub>1</sub> 和 B<sub>2</sub>, 分别对应西南地区两个大于 50 mm 的降水中心。重庆市(29.5 N, 109.5 E)和四川省万源(32.1 N, 108.0 E)的 6 h 降水量均达到 57 mm。MCS-A 和 MCS-B 是梅雨锋在长江流域产生暴雨的较典型的中尺度对流系统。MCS-C 位于海上, 缺乏降水观测资料。

图 1b 为对流层上层水汽风。图中不同颜色的风标表示不同层次的风, 这里只分析 100~250 hPa 和 251~350 hPa 的风。140 E 以西梅雨锋云带上空的水汽风场与中纬度锋面气旋的风场有显著的不同, 主要表现为:

梅雨锋云带上空为一个反气旋环流带(图 1b)。云带以北为中纬度西风, 以南为偏北风, 在这两种气

流之间构成一个反气旋环流带与水平风场的辐散带, 其宽度与云带的宽度相当。云带以南的偏北风向南流入 20 N 附近的南亚东风急流内。数值模拟的结果表明: 梅雨云带上空的反气旋环流是潜热释放的结果, 其中积云对流加热起主要作用<sup>[6]</sup>。梅雨锋云系可以认为是对流层下层的环流系统和对流层上层热带环流系统的复合体<sup>[9]</sup>。

2002 年 6 月 22 日 06 时, 在东亚大陆上空, 中纬度西风急流强度约为 40 m/s, 位于 42 N 附近, MCS-A 以北约 1000 km 处。在中纬度西风急流与 MCS-A 之间, 西风风速减至 20 m/s 左右, 表明中纬度西风急流对 MCS-A 的强迫是很小的。MCS-A 在对流层上层为一个中尺度反气旋。中尺度反气旋东侧, 出现一支风速大于 25 m/s 的流出通道。这支流出通道与中纬度西风急流是分离的, 其水平尺度约为 10<sup>2</sup> km, 具有明显的中尺度性质, 可以称为中尺度高空急流(简称为 mULJ)。这支中尺度流出通道从 MCS-A 中心向东流出后转向南, 汇入低纬度南亚东风急流中。陈受钧等<sup>[6]</sup>对梅雨锋上 MCS 的数值模拟中得到对流层上层中尺度反气旋和 mULJ, 水汽风分析证明数值模拟的结果。

梅雨锋云带上空水平风的垂直切变很小(图 1c)。云带中 150~350 hPa 平均风与 925~700 hPa 平均垂直风切变小于 5 m/s (< 1 m/s (100 hPa<sup>-1</sup>))。弱的垂直风切变是热带气旋发生的一个因子<sup>[12]</sup>。当垂直风切变小时, 有利于扰动的发展。在这种不通风的情况下, 整个扰动的温度和湿度可以大大超过周围的环境值。反之, 当水平风的垂直切变大时, 扰动是通风的, 扰动中比周围环境高的温度和湿度就会被平流带走, 不利于热带气旋的发展。除了梅雨锋的强迫, 弱的垂直风切变也是梅雨云带中 MCS 维持的一个因素, 而对流的垂直动量输送是产生小的垂直风切变<sup>[9]</sup>。位于长江上游的 MCS-B 的位置在卫星图像上虽然较偏西, 但水汽风的基本特征与 MCS-A 是一致的。

东海上空的 MSG-C 位于中纬度西风急流入口区的右侧, 这是以前研究过的梅雨暴雨在对流层上层的一种流型<sup>[6]</sup>。不同的是 MCS-C 并不完全在西风急流入口区内, 而是在一个由西风急流入口与 MCS-C 南部的偏北风构成的气流辐散区内。MCS

MCS-B 中有两个水平尺度约 200~300 km 的对流云团: B<sub>1</sub> 和 B<sub>2</sub>。

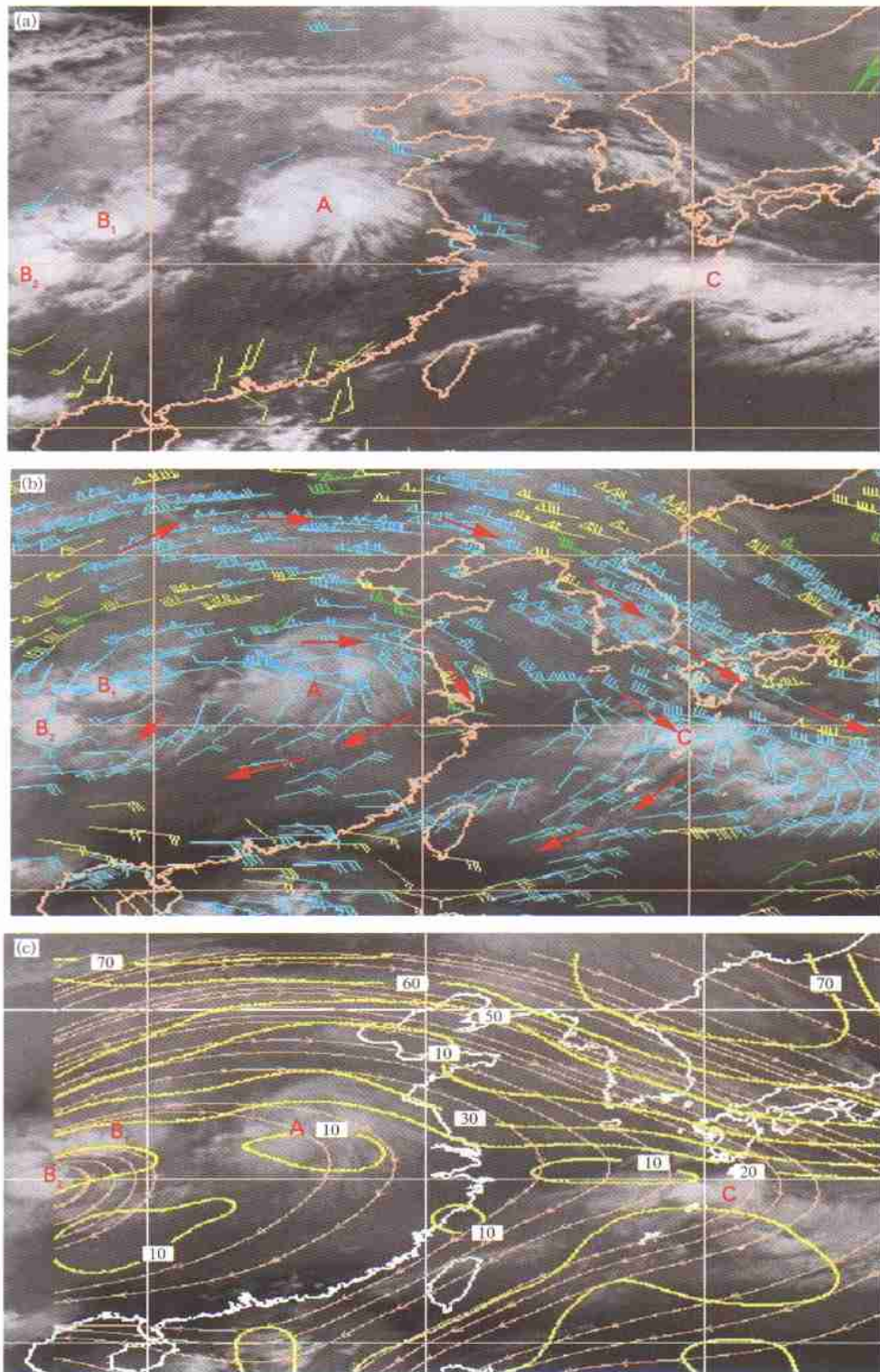


图1 2002年6月22日06时(UTC)卫星图像

(a. 红外云图, b. 水汽图像和水汽风, 蓝色: 100-250 hPa, 黄色: 251-350 hPa, 绿色: 351-500 hPa; 风羽为5 m/s,

风旗为25 m/s, c. 水汽风垂直切变(150-350 hPa平均风减925-700 hPa平均风), 单位: 0.5 m/s, 箭头线为垂直风切变的流线)

Fig.1 Satellite images at 06 UTC 22 June 2002

(a. Infrared cloud image; b. 100-250 hPa water vapor wind. A flag indicate 50 knots (1 knots = 0.51 m/s). Dashed arrows represent mid-latitude jet stream and thick arrows are the upper out flow in the MCSs, the wavy curves represent the MCSs, c. vertical shear of the water vapor wind (the deference between 150-350 hPa mean wind and 925-700 hPa mean wind), unit in knots)

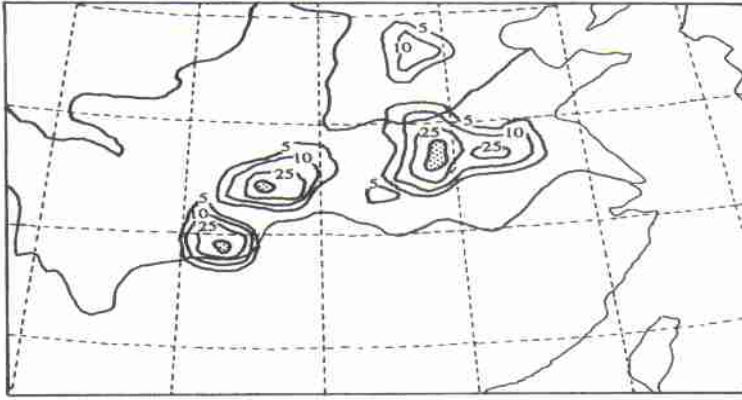


图2 2002年6月22日00~06时(UTC)的6 h降水量  
(等雨量线分别为: 5, 10, 25和50 mm, 阴影区为雨量大于50 mm)

Fig. 2. The 6 h rainfall from 00 UTC to 06 UTC 22 June 2002. Rainfall contours are in mm

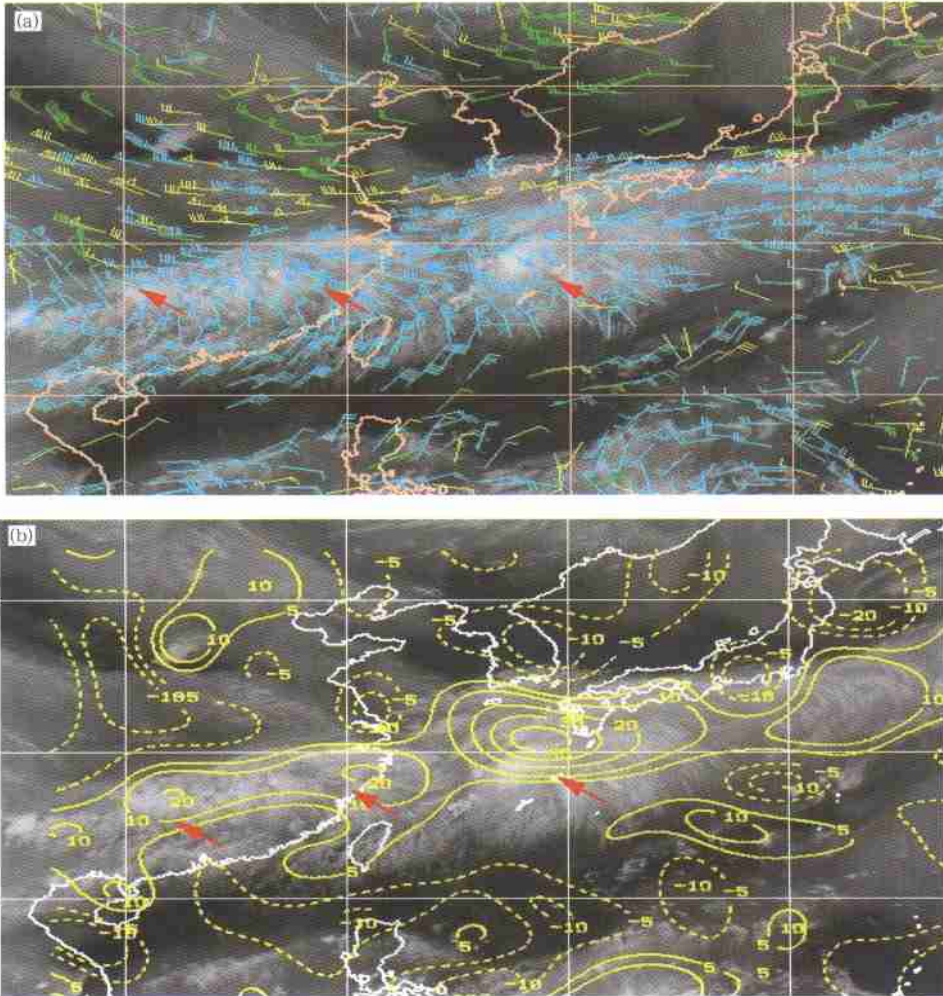


图3 2002年6月28日06时卫星图像

(a. 水汽图像和水汽风, b. 水汽图像和100~250 hPa层次内水汽风散度, 单位:  $10^6 \text{ s}^{-1}$ , 箭头示梅雨云带中的MCS, 其他说明同图1)

Fig. 3. Satellite images at 06 UTC 28 June 2002

(a. 100 hPa-250 hPa water vapor wind at 06 UTC 28 June 2002. b. divergence of the mean water vapor wind between 100 and 250 hPa. Unit in  $10^6 \text{ s}^{-1}$ )

东部的西风风速达  $20 \text{ m/s}$  以上, 是主要的流出通道。另一方面, MCS-C 南部的偏北风是另一个流出通道。

## 2.2 东海 华南地区梅雨云带

图 3a, b 分别是 6 月 28 日华南梅雨云带周边的水汽风与水汽风散度。梅雨云带自东海 ( $30 \text{ N}$ ,  $130 \text{ E}$ ) 沿  $27 \text{ N}$  向西一直延伸至广西一带, 其南北宽度约为  $400 \text{ km}$ 。云带内可以分析出 3 个 MCS (图 2 中以箭头表示)。中纬度西风急流位于云带北侧, 沿  $31 \text{ N}$  呈东 西与梅雨云带基本上平行。中纬度西风与云带南部的偏北风构成的反气旋环流带位于云带上空 (图 3a)。东海上空的 MCS ( $29 \text{ N}$ ,  $127 \text{ E}$ ) 位于西风急流轴的南侧, 其向东的流出通道的风速达  $25 \text{ m/s}$ , 是一支中尺度高空急流。这支 mULJ 是中纬度西风急流的一个分支。华南地区梅雨云带内的 2 个 MCS 均位于西风急流南侧的反气旋环流带内, 其东部的 mULJ 的风速也达  $25 \text{ m/s}$ 。

水汽风的辐散场呈带状, 位于西风急流南侧, 其宽度 (以  $5 \cdot 10^{-6} \text{ s}^{-1}$  度量) 约为  $400 \text{ km}$ , 与梅雨云带很一致 (图 3b)。在华南上空的 2 个辐散中心 ( $20 \cdot 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ ), 与 MCS 的位置近于一致。最强的辐散中心 ( $40 \cdot 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ ) 与东海的 MCS 相联系。值得指出的是: 在这条水汽风辐散带北面有一条水汽风辐合带, 辐合带位于中纬度西风急流北侧。辐合带内的 3 个辐合中心 ( $-10 \cdot 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ ) 分别和云带内的 3 个辐散中心相对应。水汽风辐散带南面有辐合, 但没有多明显的带状结构, 所以在这个个例中, 与中纬度西风急流相联系的直接环流是主要的。

## 3 讨 论

根据水汽风的初步分析, 梅雨锋云带在对流层上层为一个反气旋环流带。云带以北为中纬度西风, 以南为偏北风, 在这两种气流之间构成一个反气

旋环流带与水平风场的辐散带。

梅雨锋云系内的 MCS 在对流层上层的水汽风场可以分成两种类型: 一类是以图 1 中 MCS-A 为代表: 在对流层上层有一个中尺度反气旋, 在其东部有一支 mULJ。这支 mULJ 流向南, 并汇入南亚东风急流, 是 MCS 在对流层上层的主要流出通道。中纬度西风急流对 MCS 的强迫很小。对梅雨云带中 MCS 的数值模拟曾得到 mULJ, 并指出 mULJ 是 MCS 在对流层上层的流出通道<sup>[6]</sup>。水汽风分析验证了数值模拟的结果。另一类是以图 2 中的 MCS 为代表。MCS 位于中纬度西风急流的南侧, 与 MCS 南部的偏北风构成一个反气旋环流带。对流层上层的主要流出通道 (mULJ) 可以视为中纬度西风急流的一个中尺度分支。

对梅雨锋上的二级垂直环流, 历来有 2 种看法。一种看法是根据天气分析和数值模拟结果, 认为云带中的上升运动在对流层上层流向南, 进入低纬度南亚东风急流, 从而构成一个间接的垂直环流<sup>[6]</sup>。另一种看法认为高空西风急流与对流层下层低空急流的耦合所产生的上升运动到达对流层上层后流向北, 并在中纬度西风急流以北下沉, 从而构成一个直接的垂直环流<sup>[13]</sup>。个例 1 中的 MCS-A 有明显的间接环流, 而在个例 2 的梅雨云带中直接的垂直环流是主要的。

水汽风分析表明: 水平风在垂直方向的切变小, 即垂直气柱是不通风, 有利于 MCS 的维持。

水汽风分析可以追踪对流系统在对流层上层产生的扰动及其中尺度特征。水汽风场的水平分辨率决定于能够找到水汽场上特征点的数目和所应用的客观分析场的分辨率。本文对梅雨锋云带及其中尺度对流系统的初步分析验证了数值模拟得到的中尺度高空急流。

## 参考文献

- 1 Ding Y-H. Summer monsoon rainfalls in China. *J Meteor Soc Japan*, 1992, 70: 337~ 396
- 2 Chen S-J, L Dell Oso. Numerical prediction of a heavy rain vortex over eastern Asia monsoon region. *J Meteor Soc Japan*, 1984, 62: 730~ 747
- 3 陈受钧. 梅雨末期暴雨过程中高低空环流的耦合——数值实验. *气象学报*, 1989, 47(5): 730~ 747
- 4 孙淑清, 杜长萱. 梅雨锋的维持与其上扰动的特征. *应用气象学报*, 1996, 7(2): 154~ 159
- 5 翟国庆, 高坤, 孙淑清. 梅雨期高层流场对低层急流及中尺度系统影响的数值试验. *气象学报*, 1997, 55(6): 714~ 725
- 6 Chen S-J, Kuo Y-H, Wang W, et al. A numerical case study of rainstorm along Meiyu front. *Mon Wea Rev*, 1998, 126: 2330~ 2351
- 7 Chen S-J, Lee D-K, Kuo Y-H, et al. Mesoscale convective system over the Yellow Sea: A numerical case study. *Meteor Atmos Phys*, 1999, 70: 185~ 199

- 8 Chen S-J, Wang W, Lau K-H, et al. Mesoscale convective systems along the Meiyu front in a numerical model. *Meteor Atmos Phys*, 2000, 75, 149~ 160
- 9 Zhang Q-H, Lau Kai-Hon, Kuo Y-H, et al. A numerical study of a mesoscale convective system over the taiwan Strait, *Mon Wea Rev*, 2002(3): 1150~ 1170
- 10 Velden C S, Hayden C M, Nieman S, et al. Upper-tropospheric winds derived from geostationary satellite water vapor observations. *Bull Amer Meteor Soc*, 1997, 78(2): 173~ 195
- 11 Rosmond T E. The design and testing of the navy operational global atmospheric prediction system. *Wea Forecasting*, 1992, 7: 262~ 272
- 12 Anthes R A. Tropical cyclones their evolution, structure and effects. *Amer Meteor Soc*, 1982, 41: 208pp
- 13 Chen Y-L, Chen X-A, Zhang Y-X. A diagnostic study of low-level jet during TAMEX IOP5. *Mon Wea Rev*, 1994, 122: 2257~ 2284

## WATER VAPOR WINDS IN THE VICINITY OF CLOUD BANDS ALONG THE MEIYU FRONT

Lau Kaihon

*(Center for Coastal and Atmospheric Research Hong Kong University of Science and Technology, Hong Kong)*

Chen Shoujun

*(Laboratory for Severe Storm Research Department of Atmospheric Science, Peking University, Beijing 100871)*

### Abstract

Winds obtained by tracking features in satellite water vapor imagery have been used to analyze the upper level outflow in the vicinity of mesoscale convection systems (MCS) along the Meiyu front. Two upper level outflow patterns have been identified. The first is associated with an upper level mesoscale anticyclone, and the main upper level outflow is seen as a mesoscale upper level jet (mULJ) located to the east of MCS. This mULJ turned to the south and flow into the tropical easterly jet near 20°N, forming a secondary indirect vertical circulation to the south of Meiyu front. In this case, the forcing of the mid-latitude westerly jet is weak. The second kind of upper level outflow was generated just to the south of the extratropic westerly jet. The Meiyu cloud band is associated with an anticyclonic wind belt with mid-latitude westerlies to the north and subtropical easterlies to the south. The upper level outflow (mULJ) appeared as to be a branch of the westerly jet, which flows to the west. A secondary direct circulation is formed along this kind of Meiyu front.

The vertical wind shear in the Meiyu cloud band was less than  $1 \text{ m}/(\text{s} \cdot 100 \text{ hPa}^{-1})$ . Weak ventilation in the vertical is helpful for the maintenance of MCSs along the Meiyu front.

This primary upper level water vapor wind analyses confirm earlier numerical simulations, which show that the mULJ is the upper level outflow channel over the MCS in the Meiyu cloud band.

**Key words:** Water vapor wind, Meiyu front, MCS.