

# 强暴雨系统中湿位涡异常的诊断分析\*

高守亭 雷 霆 周玉淑

(大气边界层物理和大气化学国家重点实验室(LAPC),  
中国科学院大气物理研究所,北京 100029)

董 敏

(国家气候中心,北京 100081)

## 提 要

从动力上推导了热力、质量强迫下的湿位涡方程,阐明了在暴雨系统中引起的强降水会造成热力、质量强迫下的湿位涡异常。并用 NCEP  $1^\circ \times 1^\circ$  的分析资料对 1999 年 6 月 23 日到 6 月 26 日引起长江流域暴雨的对流系统进行了湿位涡诊断分析,分析结果表明湿位涡异常高度主要出现在 700 ~ 500 hPa 之间,中心最大值可超过 1.4 PVU。从动力和资料诊断两个方面均揭示出湿位涡异常区与强降水区有很好的对应关系。

关键词:湿位涡 热力强迫 质量强迫 暴雨

## 引 言

自 Ertel<sup>[1]</sup>给出位涡的概念以来,位涡的运用越来越广泛,特别是在研究大尺度系统有关现象时,常借助于位涡守恒原理对现象发生的机理能得以较圆满的解释。位涡概念能够如此成功地被应用于大尺度现象的研究,其主要原因在于:反映准地转运动特征的涡度方程主要是说明涡度如何变化,而不是作为制约涡度变化的一个有用的约束关系。位涡度的出现,最主要的为涡度变化提供了一个约束关系,并且适用于对斜压大气的研究<sup>[2,3]</sup>。所以 J. Pedlosky<sup>[4]</sup>曾这样强调:位涡守恒原理之重要性怎么强调也不算过分。可见位涡概念的出现把大尺度现象的研究向前大大推进了一步。利用位涡概念对大尺度现象研究的过程中,人们早就注意到了在外源强迫存在时,位涡守恒性被破坏,并因外源的强迫作用而引起位涡的异常。对大尺度系统来说,外源强迫主要是热力强迫及摩擦耗散。

但是在对中尺度现象的研究时,特别是对暴雨系统的研究,由于暴雨系统内带有强降水,所以使得暴雨系统内部质量场的变化既受到环境场的辐散、辐合的制约,又受到强降水带来的质量明显减少的制约。所以运用位涡概念对暴雨系统进行研究时,人们必须注意到有两个主要强迫源会引起位涡异常。一是同大尺度外源强迫类同的热力强迫;二是

\* 本工作得到国家重点基础研究发展规划项目“我国重大天气灾害的形成机理和预测理论研究”(G1998040907)和国家基金委资助(资助号 40035010)。

2001-01-07 收到,2002-04-18 收到修改稿。

大尺度现象中不予考虑的而在中尺度现象中却特别重要的质量强迫。正是由于这两个强迫,使得暴雨系统内的位涡发生异常。

中尺度对流系统中的位涡异常早已被气象学家们所发现, Raymond 等<sup>[5]</sup>对长寿命中尺度对流系统给出了一种位涡异常理论,但是他们当时没有考虑到质量外源强迫。最近 Gray<sup>[6]</sup>利用质量强迫模式研究了仅有质量强迫引起的位涡异常,但是在他的模式中没有考虑热力强迫,且是正压并仅适合于浅对流系统。为了深入探究中尺度对流系统中由热力及质量共同强迫下形成的位涡异常,本文从动力上论证了热力、质量强迫下的湿位涡方程。

事实上对暴雨的研究虽然很多,但至今没有从动力学上找到一个可与暴雨移动及落区对应很好的物理量。本文通过分析研究表明位涡的强迫异常与暴雨的落区及移动具有很好的对应关系,可利用位涡自身的特性及异常来示踪暴雨的落区及移动。

## 1 热力、质量强迫下的湿位涡方程

笛卡尔坐标下的涡度方程、连续性方程及热力方程为:

$$\frac{d\xi_z}{dt} = (\xi_z \cdot \nabla) \nu - \omega_a \nabla \cdot \nu - \nabla \times F \quad (1)$$

这里  $F$  包括了气压梯度力项和摩擦力项。

$$\frac{d\rho}{dt} + \rho \nabla \cdot \nu = Q_m \quad (2)$$

$$\frac{d\theta_e}{dt} = \dot{\psi} \quad (3)$$

在式(2)中加了质量强迫项  $Q_m$ ,在式(3)中加了热力强迫项  $\dot{\psi}$ 。因为我们研究的对象是饱和湿空气的强降水系统,所以在式(3)中不仅使用湿空气的位温  $\theta_e$ ,而且带有加热强迫项,以表示凝结潜热释放之外的加热(如辐射加热)对湿位温变化所起的加热强迫作用。

若用  $\nabla \theta_e$  点乘式(1)后则有:

$$\nabla \theta_e \cdot \frac{d\xi_z}{dt} = \nabla \theta_e \cdot (\xi_z \cdot \nabla) \nu - \nabla \theta_e \cdot \xi_z (\nabla \cdot \nu) - \nabla \theta_e \cdot \nabla \times F \quad (4)$$

利用连续性方程(2),式(4)可进一步写为:

$$\nabla \theta_e \cdot \frac{d\xi_z}{dt} = \nabla \theta_e \cdot (\xi_z \cdot \nabla) \nu - \nabla \theta_e \cdot \xi_z \left( \frac{Q_m}{\rho} - \frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dt} \right) - \nabla \theta_e \cdot \nabla \times F \quad (5)$$

或写为:

$$\nabla \theta_e \cdot \left| \frac{d\xi_z}{dt} + \xi_z \left( \frac{Q_m}{\rho} - \frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dt} \right) \right| = \nabla \theta_e \cdot (\xi_z \cdot \nabla) \nu - \nabla \theta_e \cdot \nabla \times F \quad (6)$$

把式(6)方括号内的个别变化项进行合并后则有:

$$\nabla \theta_e \cdot \left| \rho \frac{d}{dt} \left( \frac{\xi_z}{\rho} \right) + \xi_z \frac{Q_m}{\rho} \right| = \nabla \theta_e \cdot (\xi_z \cdot \nabla) \nu - \nabla \theta_e \cdot \nabla \times F \quad (7)$$

式(7)还可以写为:

$$\rho \frac{d}{dt} \left( \frac{\xi_a \cdot \nabla \theta_c}{\rho} \right) - \xi_a \frac{d \nabla \theta_c}{dt} + Q_m \left( \frac{\xi_a \cdot \nabla \theta_c}{\rho} \right) = \nabla \theta_c \cdot (\xi_a \cdot \nabla) \nu - \nabla \theta_c \cdot \nabla \times F \quad (8)$$

利用一致性关系,

$$\xi_a \cdot \frac{d}{dt} (\nabla \theta_c) \equiv \xi_a \cdot \nabla \frac{d \theta_c}{dt} - \nabla \theta_c \cdot (\xi_a \cdot \nabla) \nu \quad (9)$$

则给出如下位涡方程:

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\xi_a \cdot \nabla \theta_c}{\rho} \right) = \frac{1}{\rho} \xi_a \cdot \nabla \frac{d \theta_c}{dt} - \frac{Q_m}{\rho} \left( \frac{\xi_a \cdot \nabla \theta_c}{\rho} \right) - \frac{1}{\rho} \nabla \theta_c \cdot \nabla \times F \quad (10)$$

这里  $Q = \frac{\xi_a \cdot \nabla \theta_c}{\rho}$  便是湿 Ertel 位涡。利用方程(3),则式(10)可进一步写为:

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\xi_a \cdot \nabla \theta_c}{\rho} \right) = \frac{1}{\rho} \xi_a \cdot \nabla \dot{\psi} - \frac{Q_m}{\rho} \left( \frac{\xi_a \cdot \nabla \theta_c}{\rho} \right) - \frac{1}{\rho} \nabla \theta_c \cdot \nabla \times F \quad (11)$$

在实际计算中,摩擦项忽略,质量强迫项  $Q_m$  由下式给出:

$$\frac{\partial \rho_m}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_m \mathbf{v}) = - Q_m \quad (12)$$

用方程(12)计算出  $Q_m$  后,代入式(11)。式(11)左边  $\frac{d}{dt} \left( \frac{\xi_a \cdot \nabla \theta_c}{\rho} \right)$  可直接计算,然后再用这两项计算热力强迫项。

## 2 热力、质量强迫下的湿位涡异常的诊断

为了使理论具体化,我们利用 NCEP/NCAR 资料计算了 1999 年长江流域梅雨期间(6月22日~7月2日)自 850~100 hPa 各层次之间的湿位涡,结果发现长江流域暴雨过程中最明显的湿位涡异常是发生在 700~500 hPa 之间。图1、图2分别是1999年6月23日 08:00(北京时,下同)的 700 hPa 上的湿位涡分布及与之相对应的我国及其邻近地区的降水实况分布。可以看出,在长江流域自 105°~125°E 有一条西南—东北走向的湿位涡高值带,中心位于 30°N 的 105°~110°E 之间,数值高达 0.8 PVU。同这条湿位涡高值带相对应的地面图上(图2)为一条西南—东北走向的降水带,最大降水中心位于湿位涡高值中心略偏东的位置,这是因为雨水下落还受到西南气流输送的影响。

长江流域高湿位涡区同地面降水带的对应关系在图3和图4上也看得十分清楚。图3表明,在长江流域及其以东地区维持着一条由原来西南东北走向转为近东西向的高值湿位涡带,并且有两个大值湿位涡中心,分别位于 30°N 的 110°~115°E 和 118°E 附近,中心最大数值分别超过 1.2 及 0.8 PVU。从湿位涡的分布便可以预测到,地面上应有大的降水中心同其上的湿位涡高值区相对应。图4中的降水实况表明在长江流域 118°E 附近确实有大的降水中心,中心值高达 100 mm 以上,而在 110°~115°E 之间有成片 50~60 mm 的大暴雨区。

对 26 日质量强迫和热力强迫项分别做了计算,结果见图5和图6。由图可见,由质

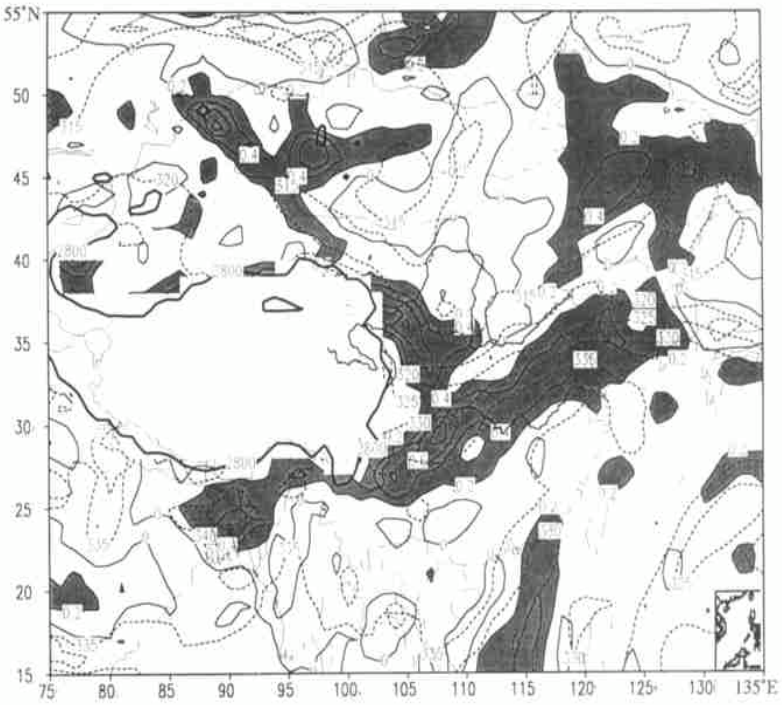


图1 1999年6月23日08:00 700 hPa上湿位涡分布  
(单位:PVU, 虚线是相当位温单位:K)

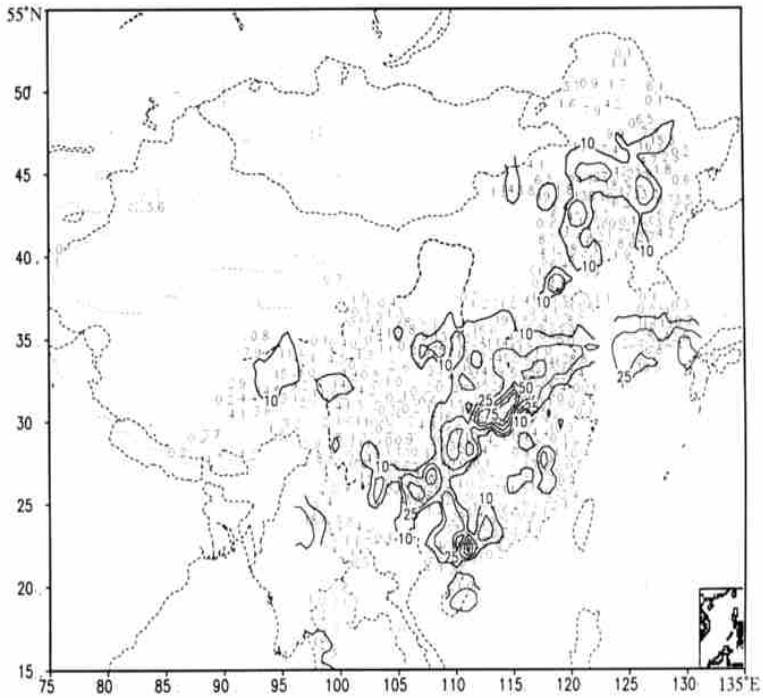


图2 1999年6月23日08:00降水实况(单位:mm)

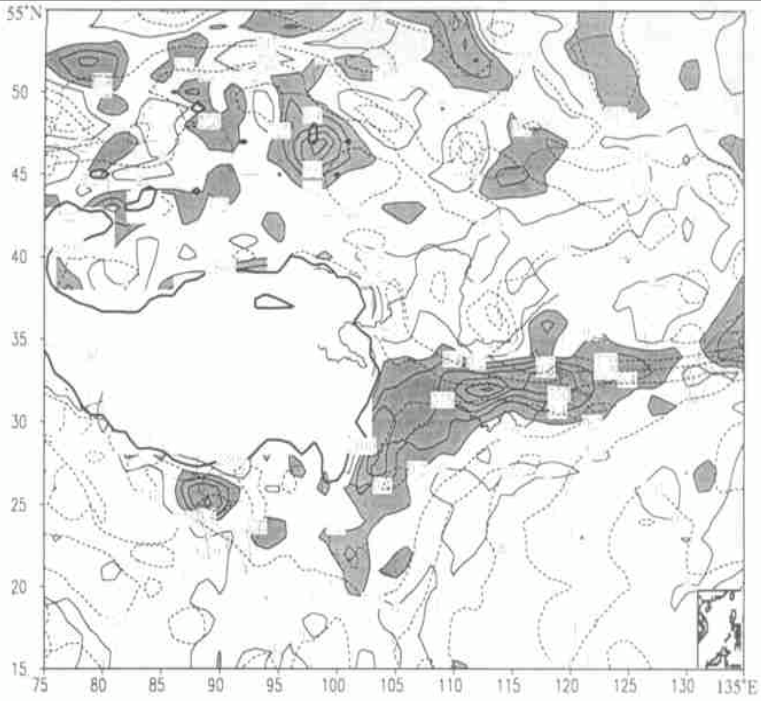


图3 1999年6月26日08:00 700 hPa上湿位涡分布  
(单位:PVU,虚线为相当位温单位:K)

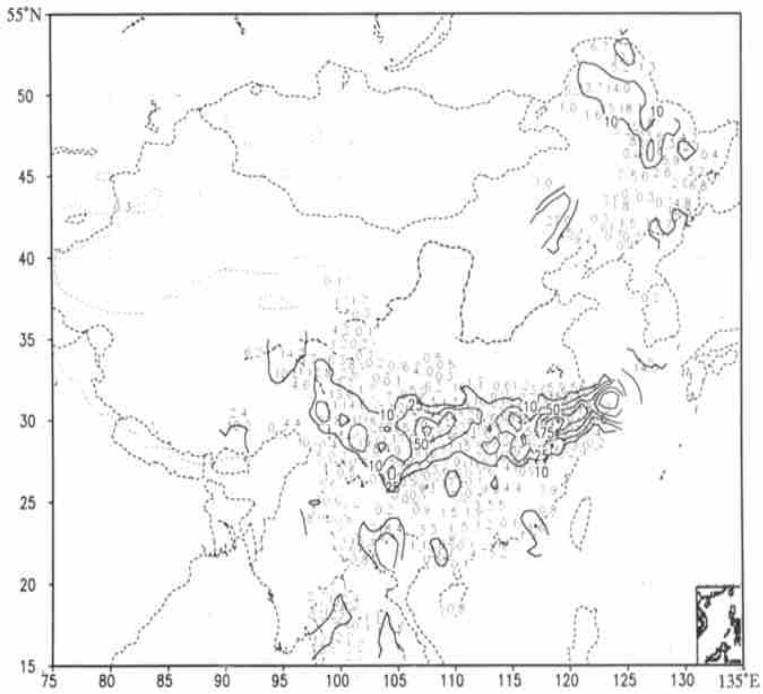


图4 1999年6月26日08:00降水实况(单位:mm)

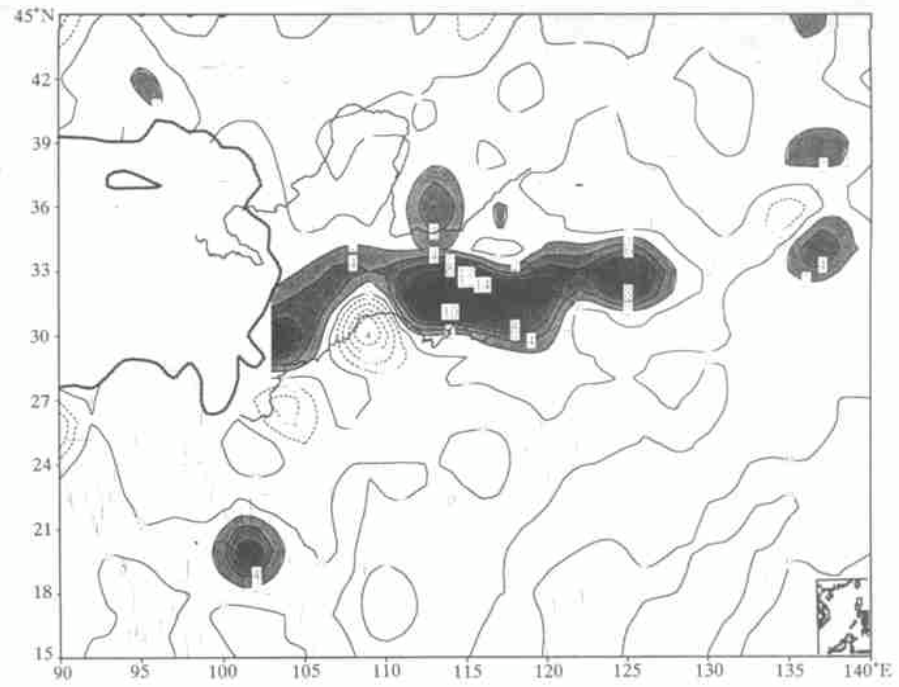


图 5 1999 年 6 月 26 日 08:00 由质量强迫造成的湿位涡变化  
(单位:  $10^{-6}$  PVU/s)

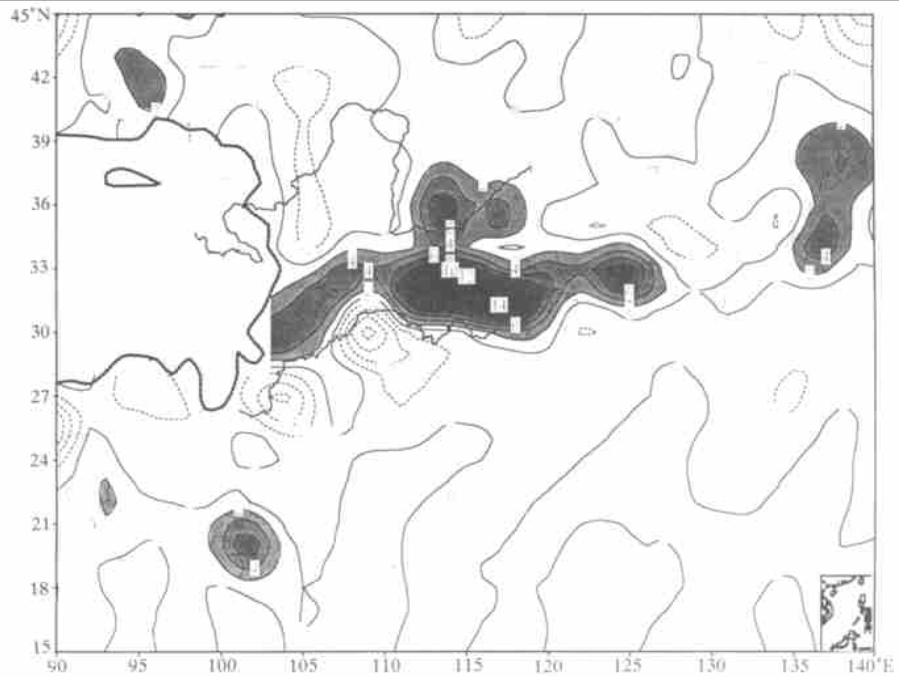


图 6 1999 年 6 月 26 日 08:00 由热力强迫造成的湿位涡变化  
(单位:  $10^{-6}$  PVU/s)

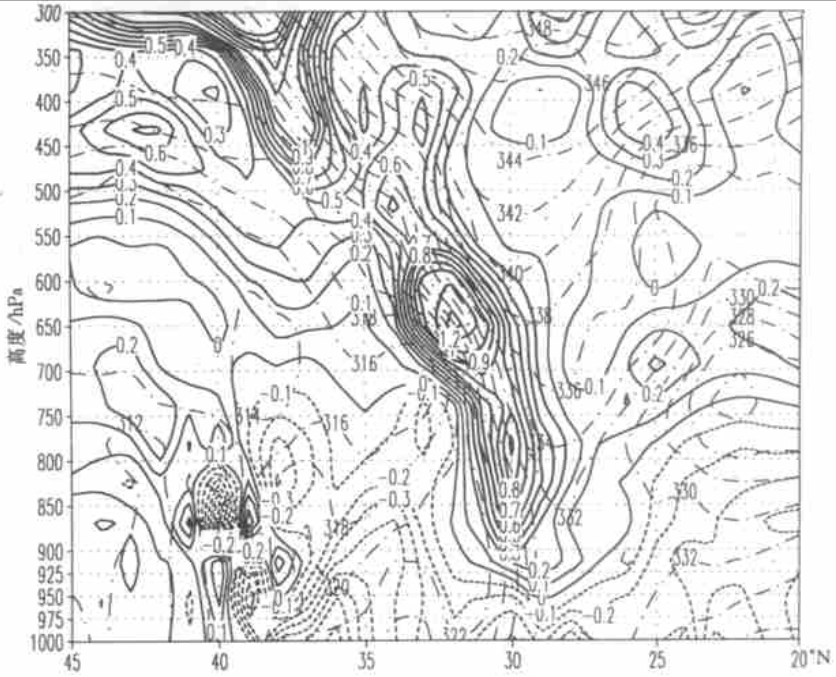


图 7 1999 年 6 月 24 日 08:00 湿位涡(单位:PVU,实线 > 0,虚线 < 0)和相当位温(单位:K,长虚线)沿 116°E 的垂直剖面

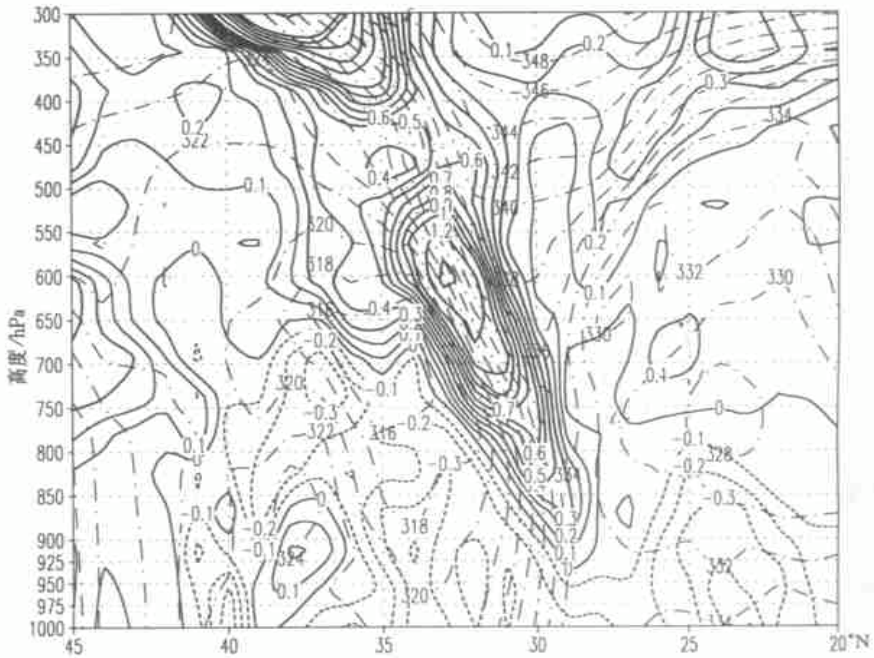


图 8 1999 年 6 月 26 日 08:00 湿位涡(单位:PVU,实线 > 0,虚线 < 0)和相当位温(单位:K,长虚线)沿 117°E 的垂直剖面

量强迫和热力强迫造成的湿位涡异常区与整个的湿位涡异常区位置和走向基本一致,量级也相当,说明在中尺度系统中除了要考虑热力强迫,也必须考虑质量强迫。

通过对 1999 年 6 月长江流域下游暴雨过程的分析和对湿位涡的诊断表明(图 7,图 8),凝结过程中的潜热释放和质量强迫所造成的湿位涡异常主要在 700 ~ 500 hPa 之间,最大中心值超过 1.4 PVU。这为我们寻找指示暴雨系统移动的强信号“湿位涡异常”产生的高度提供了科学依据。

### 3 小 结

文中一方面打破了长期以来对大尺度位涡研究中只考虑热力强迫的传统观念,明确指出在强暴雨系统中湿位涡随时间的变化不仅要受到热力强迫,而且还受到因强降水造成的质量强迫。这两种强迫共同作用的结果会引起强暴雨系统发展过程中的湿位涡异常。并用资料诊断出湿位涡异常的高度和强度,显示出湿位涡是暴雨的一种示踪物,这为暴雨预报提供了线索和思路。

### 参 考 文 献

- 1 Ertel H. Ein Neuer hydrodynamischer Wirbelsatz. *Meteor. Z.*, 1942, **59**: 277 ~ 281.
- 2 Gao Shouting, Lei Ting. Streamwise vorticity equation. *Advanced in Atmospheric Sciences*, 2000, **17**: 339 ~ 347.
- 3 Gao Shouting, Tao Shiyun, Ding Yihui. The generalized E-P flux of wave-meanflow interactions. *Sciences in China (series B)*, 1990, **33**: 704 ~ 715.
- 4 Pedlosky J. *Geophysical Fluid Dynamics*. Oxford: Oxford Press, 1979. 31.
- 5 Raymond D J, Jiang H. A theory for long-lived mesoscale convective systems. *J. Atmos. Sci.*, 1990, **47**: 3067 ~ 3077.
- 6 Gray M E B. An investigation into convectively generated potential-vorticity anomalies using a mass-forcing model. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 1999, **125**: 1589 ~ 1605.

## DIAGNOSTIC ANALYSIS OF MOIST POTENTIAL VORTICITY ANOMALY IN TORRENTIAL RAIN SYSTEMS

Gao Shouting Lei Ting Zhou Yushu

(State Key Laboratory of Atmospheric Boundary Layer Physics and Atmospheric Chemistry,  
Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029)

Dong Min

(National Climate Center, Beijing 100081)

### Abstract

The moist potential vorticity (MPV) equation with both heat and mass forcings is derived. It is clarified that both heat and mass forcings induced by the intensive precipitation in torrential rain systems can lead to moist potential vorticity anomaly. With NCEP/NCAR 1°



$\times 1^\circ$  data, the moist potential vorticity anomaly is diagnosed along the Yangtze River from June 23 to June 26 1999. The results indicate that moist potential vorticity anomaly occurs between 700 hPa and 500 hPa, and the maximum anomaly value is up to 1.4 PVU. Both dynamical and diagnostic methods reveal that moist potential vorticity anomaly regions correspond well to the regions of intensive precipitation.

**Key words:** Moist potential vorticity (MPV) Heat forcing Mass forcing Torrential rain