# 对流涡度矢量在暴雨诊断分析中的应用研究

赵宇<sup>1,2,3</sup> 高守亭<sup>1</sup>

1 中国科学院大气物理研究所云降水物理与强风暴实验室,北京 100029

2山东省气象台,济南 250031

3 中国科学院研究生院,北京 100049

**摘 要** 位涡在诊断分析中是一个常用且有效的物理量,但在深对流系统中由于湿等熵面的倾斜变得较弱。因此,本文利用高守亭等(2004)提出的新矢量——对流涡度矢量(简称 CVV)来研究深对流系统,并用对流涡度矢量诊断华北一次大范围的大到暴雨天气过程。结果表明,CVV 垂直分量在中纬度对流性暴雨中有很好的指示性,它的高值区与云中水凝物和地面降水有较好的对应关系,暴雨区位于 CVV 垂直分量高值区附近及其北侧的梯度大值区内。CVV 垂直分量是与云相联系的参数,暴雨区垂直积分和区域平均的 CVV 垂直分量和云中水凝物混合比的相关系数为 0.92,与降水率的相关系数为 0.71,比湿位涡与云中水凝物的相关系数高很多。CVV 垂直分量反映了水平涡度和水平相当位温梯度的相互作用,可以把中纬度深对流系统中的中尺度动力过程和热力过程与云微物理过程密切联系起来,有助于理解环流和云相互作用促使对流发展的机制,可以很好地追踪暴雨系统的发展和演变。

关键词 位势涡度 对流涡度矢量 暴雨 深对流系统
 文章编号 1006 - 9895 (2008) 03 - 0444 - 13
 中图分类号 P445
 文献标识码 A

#### Application of the Convective Vorticity Vector to the Analysis of a Rainstorm

ZHAO Yu1, 2, 3 and GAO Shou-Ting1

1 Laboratory of Cloud-Precipitation Physics and Severe Storms, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

2 Shandong Provincial Meteorological Observatory, Ji'nan 250031

3 Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

**Abstract** Although potential vorticity is a common and useful physical quantity for meteorological analysis, it is a little weak in deep convective systems due to the apparent slant of moist isentropic surfaces. Therefore, convective vorticity vector (CVV) introduced by Gao et al. (2004) is used to study deep convective system. By using CVV, a heavy rainfall event that occurred in North China is investigated in this paper. The result shows that the vertical component of the CVV is a good indicator for convective rainstorm in the mid-latitudes and its high value region is highly correlated with cloud hydrometeors and rainfall. The rainstorm is located in the region where the vertical component of the CVV is large and to the north of its large gradient. The vertical component of the CVV is a cloud-linked parameter. Analysis of domain-averaged and mass-integrated quantities shows that the linear correlation coefficient between the wertical component of the CVV and the sum of mixing ratio of cloud hydrometeors. The linear correlation coefficient between the wertical component of the CVV and precipitation rate is 0. 71. The vertical component of the CVV represents the interaction between horizontal vorticity and horizontal equivalent potential

**收稿日期** 2007-01-19, 2007-04-04 收修定稿

资助项目 国家自然科学基金资助项目 40433007, 中国科学院海外杰出学者基金 2005-2-17, 山东省气象局课题 2006sdqxz18

作者简介 赵宇,女,1968年出生,博士研究生,高级工程师,主要从事天气预报和中小尺度动力学的研究。E-mail: zy0817@126.com

temperature gradient, which can associate dynamic and thermodynamic processes with cloud microphysical processes. Thus it can help to understand the mechanism of convection development caused by the interaction between the circulation and clouds. Therefore, it can better trace the development and evolution of rainstorm systems. **Key words** potential vorticity, convective vorticity vector, rainstorm, deep convective system

## 1 引言

早在20世纪三、四十年代, Rossby和Ertel就 提出位涡的概念,并证明在绝热无摩擦的干空气中 位势涡度具有严格守恒的特性。20世纪80年代 初, Hoskins 等<sup>[1]</sup> 再度指出了位涡理论的应用价 值。然而,当云发展和有潜热释放时,位涡不再守 恒。Bennetts 和 Hoskins<sup>[2]</sup>引入潜热作用,导出湿 球位涡变化方程;90年代初,吴国雄等[3]用相当位 温代替位温,证明了绝热无摩擦的饱和湿空气具有 湿位涡守恒的特性,并在此基础上研究了湿斜压过 程中垂直涡度的发展。位涡综合考虑了动力因子和 热力因子, 使得位涡理论在分析天气系统演变和结 构方面有着广泛的应用[4~11]。对大尺度运动来说, 位涡是完美的,因为在笛卡尔坐标系中位温面与水 平面是近似平行的,涡度矢量和位温梯度矢量的交 角较小,两个矢量点乘的积是明显的。因此,在大 尺度运动中位涡是一个非常有效的动力示踪物。

在中尺度系统的发展演变中,位涡也有很大的 应用空间,但在深对流系统中,由于湿等熵面的倾 斜,位温梯度矢量与涡度矢量的交角变大,极端时 可接近 90°,两个矢量的点乘积趋于零,位涡变得 较弱。高守亭等<sup>[12]</sup>将位涡定义广义化,即把位势 涡度定义中涡度矢量和位温梯度的点乘改为叉乘得 到了一个新的物理量,称为对流涡度矢量(CVV), 他们在二维云分辨模式<sup>[12]</sup>及三维云分辨模式<sup>[13]</sup>中 应用对流涡度矢量研究热带对流系统得到了较有价 值的研究成果:CVV 垂直分量和热带对流密切相 关,同时证实了 CVV 垂直分量和云中水凝物具有 较高的相关性,可以在二维和三维框架中研究热带 洋面上的对流。

中国地处东亚季风区,夏季多暴雨等强对流天 气<sup>[14~17]</sup>。对暴雨天气的诊断和分析表明,吴国雄 的倾斜涡度发展理论在暴雨等中尺度天气现象成因 的分析中有较高的应用价值<sup>[18~24]</sup>,成功地解释了 一些重要的现象和事实。然而对流涡度矢量却有其 独特的特点,能把热带对流的中尺度动力过程和热 力过程与云微物理过程密切联系起来<sup>[12,13]</sup>。那么, CVV 是否仍然可以作为研究中纬度深对流系统的 有力工具?在中纬度深对流系统中是否也可以把中 尺度动力过程和热力过程与云微物理过程联系起 来?它和暴雨的关系如何?要回答以上问题需要对 对流涡度矢量进行深入的研究。

本文借助非静力中尺度模式系统 ARPS (The Advanced Regional Prediction System),对 2004 年 8月12~13日发生在华北大部地区的大到暴雨天 气过程进行数值模拟,利用模式输出的高时空分辨 率资料,计算三维(3D)对流涡度矢量,对暴雨天 气进行诊断研究。同时计算了区域平均和垂直积分 的 CVV 各分量及湿位涡与云中水凝物混合比[云 水(小云滴)、雨水(雨滴)、云冰(小冰晶)、雪和 雹]和地面降水率的相关系数,希望对三维对流涡 度矢量,尤其是对它的垂直分量与云微物理过程及 暴雨的关系有一个较清楚的认识,并探讨它在暴雨 研究和暴雨预报中的可能应用。

# 2 对流涡度矢量和湿位涡的定义和计算

在笛卡尔坐标系中,对流涡度矢量定义[12]为

$$\boldsymbol{C} = \frac{\boldsymbol{\zeta}_{a} \times \nabla \theta_{e}}{\rho}, \qquad (1)$$

湿位涡定义[3]为

$$P_{\rm m} = \frac{\boldsymbol{\zeta}_{\rm a} \cdot \nabla \theta_{\rm c}}{\rho}, \qquad (2)$$

式中 $\zeta_a$ 为绝对涡度, $\theta_e$ 为相当位温, $\rho$ 为湿空气密度。

在 z 坐标系中,绝对涡度的分量形式为

$$\boldsymbol{\zeta}_{a} = \left(\frac{\partial w}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial z}\right)\boldsymbol{i} + \left(\frac{\partial u}{\partial z} - \frac{\partial w}{\partial x} + f'\right)\boldsymbol{j} + \left(f + \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y}\right)\boldsymbol{k} = \boldsymbol{\zeta}_{x}\boldsymbol{i} + \boldsymbol{\zeta}_{y}\boldsymbol{j} + \boldsymbol{\zeta}_{z}\boldsymbol{k}, \quad (3)$$

其中, f 是地转参数,  $f=2\Omega \sin \varphi$ , 而  $f'=2\Omega \cos \varphi$ ,  $\varphi$  为纬度。由于 f'比 ( $\partial u/\partial z - \partial w/\partial x$ )小一个量 级,为计算和讨论的方便,本文计算  $\zeta_y$ 时忽略 f'。 相当位温梯度为

$$\nabla \theta_{\rm e} = \frac{\partial \theta_{\rm e}}{\partial x} \boldsymbol{i} + \frac{\partial \theta_{\rm e}}{\partial y} \boldsymbol{j} + \frac{\partial \theta_{\rm e}}{\partial z} \boldsymbol{k}, \qquad (4)$$

则对流涡度矢量为

$$C = \frac{1}{\rho} \Big[ \Big( \zeta_{y} \frac{\partial \theta_{e}}{\partial z} - \zeta_{z} \frac{\partial \theta_{e}}{\partial y} \Big) \mathbf{i} + \Big( \zeta_{z} \frac{\partial \theta_{e}}{\partial x} - \zeta_{x} \frac{\partial \theta_{e}}{\partial z} \Big) \mathbf{j} + \Big( \zeta_{x} \frac{\partial \theta_{e}}{\partial y} - \zeta_{y} \frac{\partial \theta_{e}}{\partial x} \Big) \mathbf{k} \Big] = \frac{1}{\rho} \Big\{ \Big[ \Big( \frac{\partial u}{\partial z} - \frac{\partial w}{\partial x} \Big) \frac{\partial \theta_{e}}{\partial z} - \Big( \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} + f \Big) \frac{\partial \theta_{e}}{\partial y} \Big] \mathbf{i} + \Big[ \Big( \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} + f \Big) \frac{\partial \theta_{e}}{\partial x} - \Big( \frac{\partial w}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial z} \Big) \frac{\partial \theta_{e}}{\partial z} \Big\} \Big] \mathbf{j} + \Big[ \Big( \frac{\partial w}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial z} \Big) \frac{\partial \theta_{e}}{\partial y} - \Big( \frac{\partial u}{\partial z} - \frac{\partial w}{\partial x} \Big) \frac{\partial \theta_{e}}{\partial x} \Big] \mathbf{k} \Big\} = C_{x} \mathbf{i} + C_{y} \mathbf{j} + C_{z} \mathbf{k}, \quad (5)$$

湿位涡为

$$P_{\rm m} = \frac{1}{\rho} \Big( \zeta_x \frac{\partial \theta_{\rm e}}{\partial x} + \zeta_y \frac{\partial \theta_{\rm e}}{\partial y} + \zeta_z \frac{\partial \theta_{\rm e}}{\partial z} \Big) = \frac{1}{\rho} \Big[ \Big( \frac{\partial w}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial z} \Big) \frac{\partial \theta_{\rm e}}{\partial x} + \Big( \frac{\partial u}{\partial z} - \frac{\partial w}{\partial x} \Big) \frac{\partial \theta_{\rm e}}{\partial y} + \Big( f + \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \Big) \frac{\partial \theta_{\rm e}}{\partial z} \Big].$$
(6)

对任一高度层,任一物理量 *x* 的垂直积分公式 为

$$\begin{bmatrix} x \end{bmatrix} = \int_{z_k}^{z_{k+1}} \rho x \, dz = \rho \left[ \frac{(x)_{k+1} + (x)_k}{2} \right] (z_{k+1} - z_k).$$
  
求整层积分是把各分层值相加,其中 $\rho$ 为两层之间  
的平均密度。对流涡度矢量和湿位涡的单位都是  
m<sup>2</sup>·s<sup>-1</sup>·K·kg<sup>-1</sup>。本文主要采用数值模式的输出  
结果计算各个层次对流涡度矢量在 x、y、z 方向的  
分量  $C_x$ 、 $C_y$ 、 $C_z$ 及云中水凝物混合比 ( $q_5 = q_c + q_r + q_i + q_s + q_h$ ),同时计算上述各量及湿位涡从 250 m到  
模式顶 20500 m 高度的垂直积分[ $C_x$ ]、[ $C_y$ ]、[ $C_z$ ]、  
[ $q_5$ ]、[ $\rho_m$ ] ([]表示垂直积分)。

# 3 华北大范围降水概况和大尺度环流 背景

#### 3.1 降水概况

2004 年 8 月 12 日 08 时~13 日 08 时 (北京 时,下同),受副热带高压和弱冷空气的影响,华北 大部地区出现了一次区域性大到暴雨天气过程,雨 带呈东北-西南向带状分布,覆盖河北、山西和京 津的大部地区。降雨带内有三个雨量中心,第一个 中心(最大的降水中心)位于河北省西南部的元氏 (37.75°N,114.53°E),雨量为 133.2 mm;第二个 中心位于山西中部的太谷 (37.41°N,112.58°E), 雨量为 107.2 mm;第三个中心位于天津的塘沽 (39°N,117.71°E),降水量为 68.7 mm。全国 730 个标准站的降雨量资料中,华北地区共有 29 个站 的雨量超过 50 mm,5 个站的雨量超过 100 mm (图 1a)。

#### 3.2 环流背景

2004 年 8 月 12 日 08 时 500 hPa 高空图(图 2a)上,欧亚中纬度地区为纬向型环流,贝加尔湖 东部为一小槽,槽后冷平流明显,在这个槽的东南 方沿内蒙古北部为一东北-西南向的西风槽,这种 阶梯槽的形势使得冷空气不断补充到华北地区。受 位于台湾东北部海面上台风的影响,西太平洋副热 带高压稳定在较偏北的位置,5880 gpm 线北缘位 于 39°N 附近,120°E 副高脊线位于 37°N 附近,副 热带高压的主体控制山东东部地区,华北南部地区 处于副热带高压的西北部边缘,构成了一个广泛的 气流汇合区。12 日 08 时 850 hPa 上(图 2b),山西



图 1 2004 年 8 月 12 日 08 时~13 日 08 时实况 (a) 和模拟 (b) 降水量 (单位: mm)。等值线: 5, 10, 25, 50, 60, 70, 80, 100 Fig. 1 (a) Observed and (b) simulated rainfall (mm) from 0800 LST 12 to 0800 LST 13 Aug 2004 (contours: 5, 10, 25, 50, 60, 70, 80, 100)



图 2 2004 年 8 月 12 日 08 时高度场(单位: gpm)和风场实况: (a) 500 hPa; (b) 850 hPa Fig. 2 Real geopotential height field (gpm) and wind field at 0800 LST 12 Aug 2004: (a) 500 hPa; (b) 850 hPa

北部和河北北部为一低压环流,东北-西南向的切 变线穿过华北南部地区。12日20时,低压环流向 南移动,切变线南压。地面上则为一冷锋缓慢移 动,低槽冷锋和稳定偏北的副高为暴雨的发生发展 提供了大尺度背景场,低涡及其东伸切变线为强降 水的形成提供了有利的辐合上升条件。

### 4 数值实验及模拟结果检验

#### 4.1 模式简介和模拟方案设计

本文采用美国 Oklahoma 大学风暴分析和预测 中心开发的非静力中尺度模式系统 ARPS 对此次 暴雨过程进行数值模拟。ARPS 主要是针对风暴尺 度的高分辨率区域预报系统,采用全弹性、可压缩、 非静力平衡方程组,广义高度地形追随坐标,适用于 时空尺度较小的中、小尺度和风暴尺度的天气系统。 模式模拟区域中心位置为(40.0°N,115°E),水平网 格点数为 91×91, 水平网格距为 27 km, 模式区域 在垂直方向分 43 层, 整个垂直方向的平均格距是 500 m; 采用每 6 小时间隔分辨率为 1°×1°的 NCEP 再分析资料作为模式的初始场和侧边界条 件,初始时刻利用 ARPS 的初值分析模块 ADAS, 将地面和探空资料分析到初始场中,对其进行订 正,形成模式的初值。模式以2004年8月12日08 时为初始时刻,积分24小时。模拟中主要采用如 下物理过程: Kain-Fritsch 积云对流参数化方案、 Lin 等<sup>[25]</sup> 冰微物理参数化方案、大气辐射传输参数 化方案、Noilhan/Planton 地表方案、两层土壤植被 模式及 1.5 阶 TKE 次网格湍流混合方案。

#### 4.2 数值模拟结果检验

对比24小时实况降水(图1a)与模拟结果(图 1b),可以发现模式模拟的雨带走向、雨区范围和 量级与实况有很好的一致性,但模拟的雨带整体比 实况略偏南。模式基本模拟出了三个雨量中心,模 拟的第一个雨量中心雨量为130 mm,与实况非常 接近,模拟的100 mm 雨量范围较实况偏大;模拟 的第二个雨量中心雨量为75 mm,比实况略偏小; 模拟的第三个降水中心雨量接近实况,但模拟的第 一和第三个雨量中心之间的降水比实况略偏大,故 第三个中心没有像实况那样成为一单独的中心。

本文没有获得华北地区各站的逐时降雨量资料,在分析降水时采用的是观测时间间隔为6小时的基本站资料。通过对比模拟的6小时累积降水量与实况6小时降水,可以发现模式基本复制出了这场强降水过程,降水的位置和强度与实况较接近。模式清楚地模拟出东北-西南向带状雨区的南压和暴雨中心的发展演变过程。模式积分的前6小时(图3a),模拟的雨带比实况偏南,模拟的山西中部的降水中心比实况偏东偏南,虽然模拟出河北北部一带25 mm的中心,但却偏向实况的西南部,范围也比实况偏大。模式积分到12小时,12日14~20时的累积雨量在三个降水中心位置处的模拟与实况吻合得较好,但模拟的雨量中心要比实况偏向东北,第一个雨量中心处模拟出了25 mm的降水,比实况略偏小,第三个雨量中心处模拟出50 mm的



图 3 2004 年 8 月 6 小时累积的实况 (实线)和模拟 (虚线)降水量对比 (单位:mm): (a)12 日 08~14 时; (b)12 日 14~20 时; (c) 12 日 20 时~13 日 02 时; (d) 13 日 02~08 时。等值线: 1, 5, 10, 25, 40, 50, 75

Fig. 3 Comparison of real (solid line) and simulated (dashed line) 6-h accumulated rainfall (mm): (a) 0800 - 1400 LST 12 Aug; (b) 1400 - 2000 LST 12 Aug; (c) 2000 LST 12 Aug - 0200 LST 13 Aug; (d) 0200 - 0800 LST 13 Aug. Contours: 1, 5, 10, 25, 40, 50, 75

中心,比实况偏大(图 3b)。模式积分到18小时, 12日20时~13日02时模拟的降水落区比实况略 偏南,第一个雨量中心处模拟出75mm的降水,而 实况为46mm,明显比实况偏强。而事实上,河北 元氏站97mm的降水发生在12日14~20时,从每 1小时的模拟输出(图略)看,该降水中心在12日 19~22时的雨强较大(20~30mm/h),可能是模 拟的雨峰出现时间比实况偏晚,故降水在第三个6 小时内雨量仍较大,但整个降水的生命期与实况还 是较吻合的(图 3c)。模式积分到24小时,13日 02~08时的模拟降水量与实况比较接近,但雨带 整体偏南50km左右(图 3d)。综合来看,模式预 报的降水的发生发展趋势与实况比较接近,模拟结 果基本抓住了各时段系统的演变情况,能清楚地反 映中尺度雨团的活动情况。

大尺度环流形势的检验是数值模拟研究中通常

采用的检验方法。从形势场上看,模式较好地预报 出了台风、500 hPa 西风槽、低层的切变线及其演 变。总之,这次模拟比较合理地再现了这次暴雨天 气的形成和发展过程。下面主要是通过数值模拟结 果作进一步的分析。

#### 5 暴雨形成的动力学诊断研究

#### 5.1 相当位温分析

为了对对流涡度矢量有较深入的认识,首先分 析与其相关的相当位温场在暴雨过程中的分布和演 变特征。

5.1.1 相当位温和风场的水平分布

在 12 日 08 时 850 hPa 相当位温场上 (图 4a), 有一轴向为东北-西南向的 θ。高值区从西南部伸向 华北南部,华北南部大部地区处于 345 K 的高能区 内,中心值达 354 K,表明这一带有高温高湿空气



图 4 2004 年 8 月 12 日模式模拟的 850 hPa 相当位温(单位: K)和风场(a、b)及 850 hPa (c)和 700 hPa (d)流场分布: (a) 08 时; (b) 19 时; (c) 20 时; (d) 21 时

Fig. 4 Simulated (a, b) equivalent potential temperature (K) and wind field at 850 hPa and streamline fields at (c) 850 hPa and (d) 700 hPa: (a) 0800 LST 12 Aug; (b) 1900 LST 12 Aug; (c) 2000 LST 12 Aug; (d) 2100 LST 12 Aug

堆积。42°N以北有一θ。低值区,华北北部地区处 于θ。密集区内,这个θ。线密集区是由湿度对比引 起的。从叠加的风场上看到,向北输送的西南气流 与北方南下的偏北气流正好在此交汇对峙,形成锋 面。随后,华北地区不稳定能量不断积聚,354 K 的高能区范围扩大。12 日 17 时(图略)开始明显 有冷空气南下,北部的偏北气流明显加强,等θ。密 集带在河北西南部地区(即最大降水中心的西南 部)出现了向南弯曲,随后此中尺度形变继续向南 发展,冷空气进一步加强,东北风不断加大。

12日19时(图4b),冷空气从高纬度以东北风的形式向华北南部侵入,中尺度形变的东北部形成 气旋性风场。12日20时,850hPa上的气旋性风 场明显加强(图4c),700hPa切变线上发生扰动, 可以看到有中尺度低涡的雏形形成,相应的降水强 度明显加大。12日21时,700hPa(图4d)和850 hPa上同时形成中尺度低涡。低层气旋性风场的加 强和中尺度低涡的形成非常有利于上升运动的发展,有利于暴雨中心的形成,模拟结果也显示该降水中心在 12 日 19~22 时的雨强较大,达 20~30 mm/h。

#### 5.1.2 相当位温的垂直分布

从沿 115.5°E 过第一个雨量中心的相当位温经 向垂直剖面上可以看到,12日 08时(图 5a),华北 南部 37°N~38.5°N 的 800 hPa 以下为对流不稳定 区 ( $\partial \theta_e / \partial p > 0$ ),其上部偏北地区 700~450 hPa 存 在比较强的对流不稳定区,这非常有利于华北地区 对流的发展。对流不稳定区北侧为对流稳定的干冷 空气,它和其南侧对流不稳定的暖湿空气形成 $\theta_e$  密 集带,此 $\theta_e$  密集带在 800 hPa 以上随高度明显向北 倾斜。随着降水的产生,对流层中层的不稳定能量 释放,层结向湿中性调整,降水区北侧 800 hPa 以 上的 $\theta_e$  逐渐变得陡立。到较强降水产生的 12日 19 时(图 5b),36°N~38°N 的低层 600 hPa 以下为对



图 5 2004 年 8 月 12 日模式模拟的沿 115.5°E 相当位温 (实线,单位:K)和垂直速度 (虚线,单位:m/s)的垂直分布:(a) 08 时;(b) 19 时



流不稳定区,600~300 hPa 为中性层结,300 hPa 以上为稳定层结。南下的冷空气触发了强烈的对流 不稳定能量的释放,使上升运动强烈发展,上升运 动中心位于 450~350 hPa,最大值达 0.9 m/s。 800 hPa 以上等相当位温线呈垂直走向,即暴雨区 中层层结由湿不稳定变为湿中性(∂∂<sub>e</sub>/∂ p≈0),因 为受到湿位涡守恒的制约,对流层低层的绝对涡度 会显著增加,非常有利于这一地区对流层低层中尺 度涡旋的生成或者发展,从而有利于降水的发展。

#### 5.2 对流涡度矢量分析

从上述分析可以看到,在暴雨发展过程中相当 位温面呈垂直走向,相当位温梯度与垂直涡度的交 角近 90°,对流涡度矢量的分布如何?它和云中水 凝物的关系如何?是否能示踪暴雨系统的发生发 展?

从公式(5)可知,3D 对流涡度矢量有三个分量,C<sub>x</sub>表示经向涡度和相当位温垂直梯度的相互作用以及垂直涡度和相当位温经向梯度的相互作用,C<sub>y</sub>反映纬向涡度和相当位温垂直梯度的相互作用,C<sub>z</sub>表示水平涡度和水平相当位温梯度的相互作用,C<sub>z</sub>表示水平涡度和水平相当位温梯度的相互作用。文献[12,13]中认为对流涡度矢量的垂直分量和云中水凝物混合比有较好的相关关系,对深对流活动起主要作用,因此本文重点分析 CVV 垂直分量的分布和演变特征。

5.2.1 对流涡度矢量垂直分量的分布和演变

从 12 日 08 时 850 hPa 对流涡度矢量垂直分量

的分布图(图略)上可以看到,华北南部地区为东 北-西南向带状 CVV 垂直分量正值区控制,正值区 内有两个中心,其中范围比较大、强度比较强的中 心位于 (40.5°N, 119°E) 附近, 另一个较弱中心位 于山西和河北北部。随着西风槽的南压,槽前正涡 度平流的输送使得华北南部地区的涡度增强,湿等 熵面变得陡立,对流涡度矢量也不断加强。12日 12 时 850 hPa 上 (图 6a), 华北的 CVV 垂直分量正 值带仍为东北-西南走向,正值带内形成了四个中 心,最强的中心位于河北中部,中心值达12×10<sup>-7</sup>  $m^2 \cdot s^{-1} \cdot K \cdot kg^{-1}$ , 较弱的中心位于河北南部。同时 刻 850 hPa 云中水凝物混合比分布(图 6b)显示, CVV 垂直分量高值区与云中水物质混合比高值区 对应较好。而云中水凝物含量高值区非常有利于云 的发展,从而有利于这一带降水的形成。从 CVV 垂直分量和云中水凝物混合比的逐时演变看,华北 南部一带 CVV 垂直分量大值区一直与云中水凝物 含量高值区相伴,到第一个暴雨中心开始形成的12 日19时, 云中水凝物混合比高值区南压并向西南 部伸展(图 6d),对流涡度矢量高值区(图 6c)也明 显南压并向西南部发展, 且河北和山西交界处的 CVV 垂直分量大值区明显发展。可见,850 hPa上 CVV 垂直分量大值区的移动和发展与云中水凝物 含量高值区的移动和发展是非常一致的。

从上述分析可知,对流层低层 CVV 垂直分量 高值区与云中水凝物混合比高值区有较好的对应关 系,那么 CVV 垂直分量的垂直分布又是如何?从



图 6 2004 年 8 月 12 日模式模拟的 850 hPa CVV 垂直分量(a、c,单位: 10<sup>-7</sup> m<sup>2</sup> · s<sup>-1</sup> · K · kg<sup>-1</sup>)和云中水凝物混合比(b、d,单位: 10<sup>-1</sup>g/kg)的分布:(a、b)12 时;(c、d)19 时

Fig. 6 Distributions of the simulated (a, c) vertical component of the convective vorticity vector (CVV) (10<sup>-7</sup>m<sup>2</sup> · s<sup>-1</sup> · K · kg<sup>-1</sup>) and (b,
d) sum of the cloud hydrometeors mixing ratios (10<sup>-1</sup>g/kg) at 850 hPa at (a, b) 1200 LST and (c, d) 1900 LST 12 Aug

CVV 垂直分量的经向垂直剖面图上可以看到, 暴雨区上空为 CVV 垂直分量高值区, CVV 垂直分量高值区, CVV 垂直分量高值区主要集中在对流层低层。8月12日12时(图 7a), 暴雨区上空 CVV 垂直分量的高值中心位于850hPa附近, 中心值为  $14 \times 10^{-7}$  m<sup>2</sup>·s<sup>-1</sup>·K·kg<sup>-1</sup>, 而高层的 CVV 垂直分量值较小, 暴雨区为云中水凝物质混合比高值区, 云物质伸展高度较高, 大于0.1g/kg 的云物质混合比伸展到 250hPa, 深对流特征明显。8月12日19时(图 7b), 暴雨区上空仍为CVV 垂直分量高值区, 它的大值中心位于925hPa附近, 中心值为  $14 \times 10^{-7}$  m<sup>2</sup>·s<sup>-1</sup>·K·kg<sup>-1</sup>, 但它的范围比较宽广, CVV 垂直分量分量分量分量分量

#### 5.2.2 对流涡度矢量垂直分量的垂直积分与云物 质和降水的关系

从 CVV 垂直分量和云中水凝物混合比的垂直 分布看, 它们有较好的对应关系, 但 CVV 垂直分 量在系统发展过程中垂直分布有着不同的特点。鉴于 CVV 垂直分量与云中水凝物的分布密切相关的 特点,我们考虑 CVV 垂直分量的垂直积分与云中 水凝物及暴雨落区的关系,从而揭示 CVV 垂直分 量与强降水的关系。

图 8 为 CVV 垂直分量及相应时刻云中水凝物 混合比的垂直积分的分布,可以看到 CVV 垂直分 量和云中水凝物混合比有更好的对应关系。12 日 12 时(图 8a),东北-西南向带状的 CVV 垂直分量 高值区位于华北一带,呈带状分布的云中水凝物混 合比高值区穿过 CVV 垂直分量的高值中心。从图 7a 可知此时的对流涡度矢量主要集中在 700 hPa 以下,与图 6a 相比,CVV 垂直分量的分布形势变 化不大。12 日 19 时(图 8b),CVV 垂直分量和云 中水凝物混合比明显南压,与图 6c 相比,分布形势 变化较大,降水区为一致的高值区,没有出现图 6c 中位于河北南部的负值区,CVV 垂直分量增大明



图 7 2004 年 8 月 12 日模式模拟的 CVV 垂直分量 (实线,单位: 10<sup>-7</sup> m<sup>2</sup>·s<sup>-1</sup>·K·kg<sup>-1</sup>)和云中水凝物混合比 (阴影,大于 0. 1g/kg)的 经向垂直分布: (a) 12 时沿 115.5°E; (b) 19 时沿 116°E。图下方的横线为降水区的位置

Fig. 7 Latitude – height cross sections of the simulated vertical component of the CVV (solid line, units:  $10^{-7} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{K} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) and sum of cloud hydrometeors mixing ratios (shaded, larger than 0.1 g/kg): (a) 1200 LST 12 Aug along 115.5°E; (b) 1900 LST 12 Aug along 116°E. The straight lines below the figures denotes the rain areas



图 8 2004 年 8 月 12 日模式模拟的对流涡度矢量垂直分量(实线,单位: 10<sup>-4</sup>K/s)和云中水凝物混合比(阴影,大于 0.1 kg/m<sup>2</sup>)的垂直积分: (a) 12 时; (b) 19 时

Fig. 8 Simulated mass-integrated vertical component of the CVV (solid line, units:  $10^{-4}$ K/s) and sum of the cloud hydrometeors mixing ratios (shaded, larger than 0.1 kg/m<sup>2</sup>): (a) 1200 LST 12 Aug; (b) 1900 LST 12 Aug

显,中心值达 25×10<sup>-4</sup>K/s,其高值区北侧的梯度 也明显加大,带状的云中水凝物混合比高值区仍位 于 CVV 垂直分量高值区,偏向其北侧的梯度大值 区内。因此,整层垂直积分的 CVV 垂直分量高值 区与云中水凝物有更好的对应关系,CVV 垂直分 量高值区附近及其北侧的梯度大值区是云物质含量 的高值区所在。

整层垂直积分的 CVV 垂直分量与云中水凝物 有较好的对应关系,而云中水凝物混合比高值区有 利于云的发展,因此它与地面降水的发展应该有较 好的对应关系。从 8 月 12 日 20 时~13 日 02 时 6 小时 CVV 垂直分量整层垂直积分的时间平均(图 9a),可以清楚地看到它与相应时段6小时地面实 况降水量(图9b)的分布极其相似,可见,CVV 垂 直分量高值区与降水落区确实有较好的对应关系。

为了进一步确定 CVV 垂直分量的发展演变和 地面降水的关系,利用模式输出资料,沿 115.5°E 做 CVV 垂直分量和相应时刻过去 1 小时降水量经 向剖面的时间演变。从图 10 可以清楚地看出,两 者的发展演变具有非常相似的特征,它们的走向和 大值中心都基本一致。CVV 垂直分量有两个大值 中心,过去 1 小时降水量也有两个降水中心,两者



图 9 2004 年 8 月 12 日 20 时~13 日 02 时模式模拟的 CVV 垂直分量的垂直积分 (a, 单位: 10<sup>-4</sup>K/s) 和地面实况降水量(b, 单位: mm)分布 Fig. 9 Distributions of (a) the simulated mass-integrated vertical component of the CVV (10<sup>-4</sup>K/s) and (b) the observed rainfall (mm) from 2000 LST 12 Aug to 0200 LST 13 Aug



图 10 2004 年 8 月 12 日 08 时~13 日 08 时模式模拟的沿 115.5°E 对流涡度矢量垂直分量(a,单位:10<sup>-7</sup> m<sup>2</sup>·s<sup>-1</sup>·K·kg<sup>-1</sup>)和相应时 刻过去 1 小时降水量(b,单位:mm) 在经向剖面内的时间序列

Fig. 10 Time series of longitudinal cross-sections of the simulated (a) vertical component of the CVV  $(10^{-7} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{K} \cdot \text{kg}^{-1})$  and (b) corresponding 1-h rainfall (mm) along 115. 5°E from 0800 LST 12 Aug to 0800 LST 13 Aug 2004

在时间上和空间上的分布具有很好的一致性,只是 两者的高值中心出现时间略有差异。这可能是由于 云的发展和降水的发展并不完全同步所致,云的发 展往往要先于降水,而 CVV 垂直分量虽然与云中 水凝物具有较好的对应关系,但它和云中水凝物的 发展也不完全同步所致。但以上结果仍可以较好地 表明 CVV 垂直分量在时间上和空间上与云的发展 和地面降水的发展有较好的对应关系。

5.2.3 对流涡度矢量各分量及湿位涡与云物质及 降水率的关系

从上述分析可知,CVV 垂直分量与云中水凝物和地面降水落区具有很好的对应关系,那么进一

步做区域平均看它们的相关性如何。本文选取降水 发生的主要区域(35°N~40°N,112°E~118°E)(图 9b方框所示),计算区域平均的[ $C_x$ ]、[ $C_y$ ]、[ $C_z$ ] 和[ $q_5$ ]的垂直积分。图 11a为区域平均的[ $C_x$ ]、 [ $C_y$ ]、[ $C_z$ ]和[ $q_5$ ]的时间序列,图 11b为区域平均 的降水率的时间序列。从图 11a中可以看出,[ $C_z$ ] 和[ $q_5$ ]两条曲线的形状非常相像,它们都有两个峰 值和一个谷值,降水前期云中水凝物的峰值出现的 时间比 CVV 垂直分量的峰值出现的时间要早,这 与通常云的发展超前于降水的发展是非常一致的, 降水后期两者峰值出现的时间几乎一致。从表1可 知它们的相关系数高达 0.92,这充分表明 CVV 垂



图 11 (a) 模式模拟的区域平均和垂直积分的[ $C_x$ ](单位:  $10^{-2}$ K/s)、[ $C_y$ ](单位:  $10^{-2}$ K/s)、[ $C_z$ ](单位:  $10^{-4}$ K/s)和[ $q_5$ ](单位:  $10^{-1}$ kg/m<sup>2</sup>)的时间序列; (b) 模式模拟的区域平均的降水率 (单位:  $10^{-4}$ kg·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>)的时间序列

Fig. 11 (a) Simulated time series of domain-mean and mass-integrated zonal component  $[C_x]$  ( $10^{-2}$  K/s), meridional component  $[C_y]$  ( $10^{-2}$  K/s), vertical component  $[C_z]$ ( $10^{-4}$  K/s) and the sum of the cloud hydrometeors mixing ratios  $[q_5]$  ( $10^{-1}$  kg/m<sup>2</sup>); (b) simulated time series of domain-mean precipitation rate ( $10^{-4}$  kg  $\cdot$  m<sup>-2</sup>  $\cdot$  s<sup>-1</sup>)

和

直分量是与云发展密切相联系的参数,可以直接反 映地面降水的发生发展,而 CVV 垂直分量与降水 率的相关系数为 0.71,进一步证实了上述结论。  $[C_x]$ 为负值,它的变化与 $[q_5]$ 变化呈反位相,相关 系数为-0.79。 $[C_y]$ 虽为正值,但它在前 6 小时的 积分中与 $[q_5]$ 呈反位相,后 18 个小时的积分中与  $[q_5]$ 位相一致,其极值的出现时间要比 $[q_5]$ 滞后 3 小时,两者的相关系数仅为 0.19。而地面降水率随 时间的演变趋势与 $[q_5]$ 非常相像,基本上是同位相 分布,它的峰值及谷值出现的时间与 $[q_5]$ 大体相 当。可见,CVV 垂直分量是与云发展相联系的参 数,可以追踪暴雨系统的发展和演变。

从表1还可以看到湿位涡和云中水凝物混合比的相关系数仅为0.47,湿位涡与降水率的相关系数 为-0.27,远比 CVV 垂直分量与云中水凝物的相 关系数低。因此,在研究暴雨落区方面 CVV 垂直 分量比湿位涡具有一定的优势。

5.2.4 对流涡度矢量垂直分量的物理意义

从上面的研究可知, CVV 垂直分量与暴雨落 区息息相关, 在对流性暴雨中有一定的指示性, 那 么为什么会有这种指示性?为什么 CVV 垂直分量 与暴雨落区的相关比湿位涡与暴雨落区的相关要 高?下面从它的表达式出发, 对它的物理意义进行 深入的探讨。由(5)式可知,

#### 表 1 对流涡度矢量的三个分量及湿位涡与云中水凝物混 合比和降水率的相关系数

Table 1 The linear correlation coefficients between the components of the CVV and cloud hydrometeors mixing ratios, between moist potential vorticity and cloud hydrometeors mixing ratios, between the components of the CVV and precipitation rate, between moist potential vorticity and precipitation rate

	云中水凝物混合比	降水率
对流涡度矢量 x 分量	-0.7877	-0.8875
对流涡度矢量 y 分量	0.1928	-0.4966
对流涡度矢量 z 分量	0.9217	0.7073
湿位涡	0.4656	-0.2719

$$C_{z} = \frac{1}{\rho} \Big[ \Big( \frac{\partial w}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial z} \Big) \frac{\partial \theta_{e}}{\partial y} - \Big( \frac{\partial u}{\partial z} - \frac{\partial w}{\partial x} \Big) \frac{\partial \theta_{e}}{\partial x} \Big],$$

CVV 垂直分量是由涡度的水平分量和相当位温的水平梯度决定的。把上式分为两项,

$$C_{z1} = \frac{1}{\rho} \left( \frac{\partial w}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial z} \right) \frac{\partial \theta_{e}}{\partial y}$$

$$C_{z^2} = -\frac{1}{
ho} \Big( \frac{\partial u}{\partial z} - \frac{\partial w}{\partial x} \Big) \frac{\partial \theta_{\mathrm{e}}}{\partial x}.$$

由于垂直速度比水平速度小,而水平尺度又比 垂直尺度大得多, $\partial w/\partial y$ 和 $\partial w/\partial x$ 项较小, $C_{z1}$ 中  $-(1/\rho)(\partial v/\partial z)(\partial \theta_e/\partial y)$ 起主要作用,其中 $\partial v/\partial z$ 为经向风垂直切变,与系统发展的经向次级环流相 联系,而 $\partial \theta_e / \partial y$ 为相当位温的经向梯度,反映了经向湿斜压性,与系统发展的经向锋生锋消有关。同理, $C_{z2}$ 中- $(1/\rho)(\partial u/\partial z)(\partial \theta_e / \partial x)$ 为主要项,其中 $\partial u/\partial z$ 为纬向风垂直切变,与系统发展的纬向次级环流有关; $\partial \theta_e / \partial x$ 为相当位温的纬向梯度,表示纬向湿斜压性,与系统发展的纬向锋生锋消过程有关。由此可见,CVV垂直分量是将水平风垂直切变和水平方向相当位温梯度很好地耦合在一起的一个物理量,综合反映了系统发展过程中次级环流和水平湿斜压性的变化。

暴雨系统发展过程中的次级环流与上升运动密 切相关,上升运动又是成云致雨的关键,这说明了 CVV 垂直分量与云中水凝物具有相当高的相关性 的原因。次级环流反映了暴雨系统发展的动力作 用,而水平湿斜压性包含了水汽,反映了系统发展 的热力作用。CVV 垂直分量把系统发生发展的动 力作用和热力作用密切地联系在一起,而云的形成 和发展虽然直接是由云的微物理过程决定的,但动 力过程和热力过程在对流系统的发展演变过程中间 接地决定着云的微物理过程。因此,CVV 垂直分 量架起了中尺度动力过程和热力过程与云微物理过 程相互联系的桥梁,可以很好地揭示降水的发生发 展,从而可以较好地追踪暴雨系统的发展和演变。

由于水平旋转环流比次级垂直环流强得多,湿 位涡主要代表垂直涡度和相当位温垂直梯度的相互 作用,与水平旋转环流(涡度的垂直分量)和稳定 度参数(垂直相当位温梯度)相联系。暴雨等深对 流系统通常在对流中性环境中发展,在中性层结中 相当位温的水平梯度大、垂直梯度小;同时,强的 水平旋转环流和强的上升运动并不是一一对应关 系,有时强的水平旋转环流并不对应强的上升运 动,比如层状云降水系统具有非常强的水平旋转环 流,但上升运动较弱,这就说明了为什么湿位涡和 云物质的相关系数要比 CVV 垂直分量与云物质的 相关系数弱的缘故。

综上所述, CVV 垂直分量与云物质和暴雨落 区有较高的相关关系,把系统发生发展的动力过程 和热力过程与云微物理过程密切地联系在一起,在 暴雨研究和暴雨预报中有一定的应用价值和前景。

#### 6 结论

本文利用中尺度模式系统 ARPS 模拟华北一

次大到暴雨天气过程,利用模式提供的高时空分辨 率资料,计算新矢量( $(\boldsymbol{\zeta}_a \times \nabla \theta_e)/\rho$ )[对流涡度矢量 (CVV)]在x, y, z方向的三个分量,并对各分量 (主要是垂直分量)与暴雨的关系进行研究,得到 如下结论:

(1) CVV 垂直分量在华北对流性暴雨中有很好的指示性,其高值区与云中水凝物混合比的高值 区为正相关关系。暴雨区区域平均和垂直积分的 CVV 垂直分量和云中水凝物混合比的相关系数为 0.92,远高于湿位涡和云中水凝物混合比的相关系数。

(2) CVV 垂直分量的高值区与暴雨落区有较 好的对应关系,暴雨区位于 CVV 垂直分量的高值 中心附近,偏向其北侧的梯度大值区内。

(3) CVV 垂直分量是将水平风垂直切变和水 平方向相当位温梯度很好地耦合在一起的一个物理 量,综合反映了系统发展过程中次级环流和水平湿 斜压性的变化。它把系统发生发展的动力作用和热 力作用很好地联系在一起,同时建立起中尺度动力 过程和热力过程与云微物理过程相互联系的桥梁, 可以很好地追踪暴雨系统的发展和演变,矢量分析 可以分别用于研究涡度的水平和垂直分量在对流发 展中的作用。

(4) 对流涡度矢量 x 方向分量与云中水凝物和 降水率有很好的负相关, 它与暴雨落区的关系我们 将在另文中讨论。

#### 参考文献 (References)

- Hoskins B J, McIntyre M E, Robertson A W. On the use and significance of isentropic potential vorticity maps. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 1985, 111: 877~946
- Bennetts D A, Hoskins B J. Conditional symmetric instability—A possible explanation for frontal rainbands. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 1979, 105: 945~962
- [3] 吴国雄, 蔡雅萍, 唐晓菁. 湿位涡和倾斜涡度发展. 气象学报, 1995, 53 (4): 387~404
  Wu Guoxiong, Cai Yaping, Tang Xiaojing. Moist potential vorticity and slantwise vorticity development. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 1995, 53 (4): 387~404
- [4] Cao Z, Cho H. Generation of moist potential vorticity in extratropical cyclones. J. Atmos. Sci., 1995, 52: 3263~3282
- [5] Cho H, Cao Z. Generation of moist potential vorticity in extratropical cyclones. Part II: Sensitivity to moisture distribution. J. Atmos. Sci., 1998, 55: 595~610

- Huo Zonghui, Zhang Da-Lin, Gyakum J R. Interaction of potential vorticity anomalies in extratropical cyclogenesis.
   Part I: Static piecewise inversion. Mon. Wea. Rev., 1999, 11: 2546~2562
- Huo Zonghui, Zhang Da-Lin, Gyakum J R. Interaction of potential vorticity anomalies in extratropical cyclogenesis.
   Part II: Sensitivity to initial perturbations. Mon. Wea. Rev., 1999, 11: 2563~2575
- [8] Martin J E, Marsili N. Surface cyclolysis in the North Pacific Ocean. Part II: Piecewise potential vorticity diagnosis of a rapid cyclolysis event. *Mon. Wea. Rev.*, 2002, **130**: 1264~1281
- [9] Lackmann G M. Cold-frontal potential vorticity maxima, the low-level jet, and moisture transport in extratropical cyclones. Mon. Wea. Rev., 2002, 130: 59~74
- [10] Atallah E H, Bosart L F. The extratropical transition and precipitation distribution of hurricane Floyd (1999). Mon. Wea. Rev., 2003, 131: 1063~1081
- [11] Cui Xiaopeng, Gao Shouting, Wu Guoxiong. Moist potential vorticity and up-sliding slantwise vorticity development. *Chinese Phys. Lett.*, 2003, **20**: 167~169
- [12] Gao S T, Ping F, Li X, et al. A convective vorticity vector associated with tropical convection: A two-dimensional cloudresolving modeling study. J. Geophys. Res., 2004, 109: D14106, doi:10.1029/2004JD004807
- [13] Gao S T, Li X, Tao W, et al. Convective and moist vorticity vectors associated with tropical oceanic convection. A threedimensional cloud-resolving model simulation. J. Geophys. Res., 2007, 112: D01105, doi: 10.1029/2006JD007179
- [14] 龚佃利,吴增茂,傅刚. 一次华北强对流风暴的中尺度特征 分析. 大气科学, 2005, 29 (3): 453~464
  Gong Dianli, Wu Zengmao, Fu Gang. Analysis of the mesoscale characteristics about a severe thunderstorm in North China. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2005, 29 (3): 453~464
- [15] 矫梅燕,毕宝贵,鲍媛媛,等. 2003年7月3~4日淮河流域 大暴雨结构和维持机制分析.大气科学,2006,30(3):475 ~490

Jiao Meiyan, Bi Baogui, Bao Yuanyuan, et al. Thermal and dynamical structure of heavy rainstorm in the Huaihe River basin during 3-4 July 2003. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2006, **30** (3):  $475 \sim 490$ 

[16] 杨帅,高守亭. 三维散度方程及其对暴雨系统的诊断分析. 大气科学,2007,**31**(1):167~179

> Yang Shuai, Gao Shouting. Three-dimensional divergence equation and its diagnosis to storm rainfall system. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2007, **31**

(1): 167~179

- [17] Cui Xiaopeng, Gao Shouting, Li Xiaofan. Diagnostic analysis of mesoscale rainstorms in the Jiang-Huai valley of China with convective vorticity vector. *Progress in Natural Science*, 2007, **17** (4): 71~80
- [18] 刘还珠,张绍晴. 湿位涡与锋面强降水天气的三维结构.应用气象学报,1996,7(3):275~283
  Liu Huanzhu, Zhang Shaoqing. Moist potential vorticity and the three dimensional structure of a cold front with heavy rainfall. *Journal of Applied Meteorology* (in Chinese), 1996,7(3):275~283
- [19] 李英,段旭. 湿位涡在云南冰雹天气分析中的应用. 应用气象学报,2000,11 (2):242~247
  Li Ying, Duan Xu. Diagnostic analysis of moist potential vorticity for hail in southern Yunnan. Journal of Applied Meteorology (in Chinese), 2000, 11 (2): 242~247
- [20] 寿绍文,李耀辉,范可.暴雨中尺度气旋发展的等熵面位涡分析. 气象学报,2001,59 (5):560~568
  Shou Shaowen, Li Yaohui, Fan Ke. Isentropic potential vorticity analysis of the mesoscale cyclone development in a heavy rain process. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 2001, 59 (5): 560~568
- [21] Gao Shouting, Lei Ting, Zhou Yushu. Moist potential vorticity anomaly with heat and mass forcings in torrential rain systems. *Chinese. Phys. Lett.*, 2002, **19** (6): 878~880
- [22] 高守亭, 雷霆, 周玉淑, 等. 强暴雨系统中湿位涡异常的诊断分析. 应用气象学报, 2002, 13 (6): 662~670
  Gao Shouting, Lei Ting, Zhou Yushu, et al. Dianostic analysis of moist potential vorticity anomaly in torrential rain systems. *Journal of Applied Meteorology* (in Chinese), 2002, 13 (6): 662~670
- [23] 蒙伟光,王安宇,李江南,等. 华南暴雨中尺度对流系统的 形成及湿位涡分析. 大气科学, 2004, 28 (3): 330~341
  Meng Weiguang, Wang Anyu, Li Jiangnan, et al. Moist potential vorticity analysis of the heavy rainfall and mesoscale convective systems in South China. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2004, 28 (3): 330~341
- [24] 毕宝贵,刘月巍,李泽椿. 2002年6月8~9日陕南大暴雨数 值模拟研究. 大气科学, 2005, 29 (5): 814~826
  Bi Baogui, Liu Yuewei, Li Zechun. Numerical simulations extremely heavy rain in the southern Shaanxi Province during 8 - 9 June 2002. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 2005, 29 (5): 814~826
- [25] Lin Y-L, Farley R D, Orville H D. Bulk parameterization of the snow field in a cloud model. J. Appl. Meteor., 1983, 22: 1065~1092