齐彦斌, 冉令坤, 洪延超. 2010. 强降水过程中热力切变平流参数的诊断分析 [J]. 大气科学, 34 (6): 1201 - 1213. Qi Yanbin, Ran Lingkun, Hong Yanchao. 2010. Diagnosis of thermodynamic shear advection parameter in heavy rainfall events [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 34 (6): 1201-1213.

# 强降水过程中热力切变平流参数的诊断分析

齐彦斌<sup>1,2</sup> 冉令坤<sup>1</sup> 洪延超

1 中国科学院大气物理研究所,北京 100029 2 吉林省人工影响天气办公室,长春 130062

**摘 要**在以往研究的基础上,本文把对流涡度矢量的垂直分量、水平散度和广义位温的垂直梯度有机地结合起来,引入热力切变平流参数的概念。本文针对两次强降水过程,利用 NCEP/NCAR 全球最终分析资料对热力切变平流参数进行诊断分析,结果表明,热力切变平流参数能够比较准确地综合表征雨区上空水平风场切变和湿等 熵面漏斗状向下伸展等动力学和热力学典型的垂直结构特征,因而该参数与降水系统的发展演变密切相关,与观测的6小时累积地面降水区存在一定的对应关系;在空间水平分布和时间演变趋势上,热力切变平流参数的异常 值区覆盖着观测的6小时累积地面降水区;该参数在降水区内表现为强信号,而在非降水区表现为弱信号。影响 热力切变平流参数发展演变的因素分析表明,该参数倾向方程中通量散度项的异常值区覆盖着观测的6小时累积 地面降水区,表明雨区内通量散度项导致的热力切变平流参数变化比较明显,其中纬向风速与经向风速相互作用 的贡献是不容忽略的。

关键词 热力切变平流参数 对流涡度矢量 水平散度 广义位温 文章编号 1006-9895 (2010) 06-1201-13 **中图分类号** P426 **文献标识码** A

## Diagnosis of Thermodynamic Shear Advection Parameter in Heavy Rainfall Events

QI Yanbin<sup>1, 2</sup>, RAN Lingkun<sup>1</sup>, and HONG Yanchao<sup>1</sup>

Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029
 Jilin Weather Modification Office, Changchun 130062

**Abstract** On the basis of previous studies, a thermodynamic shear advection parameter is defined by involving vertical component and horizontal divergence of convective vorticity vector, and vertical gradient of generalized potential temperature. The parameter is characterized by describing dynamical characteristics of horizontal wind shear and thermodynamic characteristics of downward funnel-shaped moist isentropic surface over extreme weather regions. The parameter is calculated with NCEP/NCAR global final analysis data in two heavy-rainfall events in China. The result shows that the positive high-value area of the parameter vertically integrated always covered the observed 6-h accumulated surface rainfall. Both of them shared a similar horizontal distribution pattern and an analogous temporal evolution trend. The parameter in the precipitation zone showed a strong signal, while it presented a weak signal in the non-rainfall areas. Since the parameter is capable of presenting typical vertical structure of dynamical and thermodynamic fields over extreme weather area, it is closely related to the precipitation weather system leading to heavy

**收稿日期** 2009-08-22, 2010-07-16 收修定稿

资助项目 国家重点基础研究发展计划项目 2009CB421505,中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室开放课题 2009LASW-B01,国家自然科学基金资助项目 40875032、40875002,科技部/财政部公益性行业(气象)科研专项 GYHY200906004

作者简介 齐彦斌,男,1963年出生,博士,主要从事云微物理和人工影响天气研究。E-mail:qiyanbin88@126.com

rainfall. This is the reason that there is a corresponding relationship between the parameter and the observed 6-hour accumulative rainfall areas. It was also shown that the precipitation area was covered by the abnormal-value region of flux divergence term in the parameter equation. This indicated that the flux divergence prompted the parameter to revolve over the precipitation area. The contribution to the local change of the parameter from the interaction between zonal and meridional winds in the flux divergence term is chief.

Key words thermodynamic shear advection, convective vorticity vector, horizontal divergence, generalized potential temperature

### 1 引言

长期以来,气象学家和气象预报员对暴雨落区 和暴雨系统移动方向的预报问题一直非常关注,在 这方面开展了大量卓有成效的研究工作,取得了丰 硕的研究成果(程麟生和冯伍虎,2001;毕宝贵等, 2005; 孙淑清和周玉淑, 2007), 先后建立多个对地 面降水具有明确指示意义的宏观物理量(伍荣生和 谈哲敏, 1989; 陈忠明等, 2006; 王东海等, 2009), 例如,各种形式的Ertel 位涡(Ertel, 1942; 吴国雄 等,1995;高守亭等,2002;周玉淑等,2007;段廷 扬等,2007;周玉淑,2009)。由于位涡能够综合表 征天气系统的动力学和热力学特征,所以它已经成 为天气预报中一个重要的参考量;然而位涡在赤道 地区应用时存在一定的局限性,为此,Gao et al. (2004a)提出了两维对流涡度矢量的概念,其垂直 分量因为综合了水平风速的垂直切变和大气斜压性 两个重要的动力学和热力学因素,所以可以有效地 表征赤道地区深对流系统的发展演变 (Gao et al., 2005, 2007)。除了风场的垂直切变和大气斜压性, 大气低层辐合高层辐散也是暴雨过程的一个重要动 力学特征,但水平散度与地面雨区往往并不完全对 应。为了更好地利用对流涡度矢量的垂直分量和水 平散度来描述降水系统的发展演变,同时考虑到暴 雨过程中湿等熵面倾斜等特点,本文在以往研究的 基础上,综合考虑暴雨过程的动力学和热力学性 质,采用广义位温 (Gao et al., 2004b),把对流涡 度矢量的垂直分量与水平散度和广义位温垂直梯度 耦合起来,提出热力切变平流的概念,并利用 NCEP/NCAR 全球最终分析资料对暴雨过程中热 力切变平流参数所表征的动力学和热力学性质及其 与观测的 6 小时累积地面降水之间的联系进行诊断 分析,在此基础上进一步讨论影响暴雨过程中热力 切变平流参数发展演变的主要因素。

## 2 热力切变平流参数

在等压坐标系中,我们首先引入标量

$$J = -\frac{\partial \boldsymbol{v}}{\partial p} \cdot \nabla \theta^* , \qquad (1)$$

其中,  $v = (u, v, \omega)$  为速度矢量,  $u, v \pi \omega$  分别为 等压坐标系中 x 方向、y 方向和垂直方向的速度分 量,  $\nabla = \frac{\partial}{\partial x} \mathbf{i} + \frac{\partial}{\partial y} \mathbf{j} + \frac{\partial}{\partial p} \mathbf{k}$  为三维空间梯度算子,  $\mathbf{i}$ 、  $\mathbf{j}$  和  $\mathbf{k}$  分别为 x 方向、y 方向和垂直方向的单位矢 量。在(1) 式中,  $\theta^*$  为广义位温, 其表达式为

$$\theta^* = \theta \exp\left[\frac{L_{\rm v} q_{\rm vs}}{c_{\rm p} T_{\rm c}} \left(\frac{q_{\rm v}}{q_{\rm vs}}\right)^k\right],\tag{2}$$

其中, $\theta = T\left(\frac{p_s}{p}\right)^{\frac{k}{c_p}}$ 为位温, $q_v$ 为水汽比湿, $q_{vs}$ 为饱 和水汽比湿,T为温度, $T_c$ 为对流抬升凝结高度的 温度, $L_v$ 为凝结潜热,k为经验常数。当大气不含 任何水汽时, $\theta^* = \theta$ ,即广义位温退化为位温;当大 气为饱和湿空气时, $\theta^* = \theta \exp[(L_v q_{vs})/(c_p T_c)]$ , 即广义位温演变为传统的相当位温。利用等压坐标 系中热力学方程  $d\theta/dt = S_{\theta}$ (其中, $S_{\theta}$ 为位温的源汇 项, $d/dt = \partial/\partial t + v \cdot \nabla$ ),可以推导出广义位温方程

$$\frac{\mathrm{d}\theta^*}{\mathrm{d}t} = S_{\theta^*} , \qquad (3)$$

其中,

$$S_{\theta^*} = \frac{\theta^*}{\theta} S_{\theta} + \theta^* \ln\left(\frac{\theta^*}{\theta}\right) \\ \left[k \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t} (\ln q_{\mathrm{v}}) + (1-k) \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t} (\ln q_{\mathrm{vs}}) - \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t} (\ln T_{\mathrm{c}})\right]$$

为广义位温的源汇项。 利用等压坐标系中质量连续性方程

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial \omega}{\partial p} = 0, \qquad (4)$$

(1) 式又可以写为

$$J = -\left(\frac{\partial u}{\partial p}\frac{\partial \theta^*}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial p}\frac{\partial \theta^*}{\partial y}\right) + \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y}\right)\frac{\partial \theta^*}{\partial p}.$$
(5)

(5) 式右端第一项为等压坐标系中对流涡度矢量的 垂直分量,综合体现了水平风场垂直切变与大气斜压 性的耦合效应, 第二项为水平散度 ( $\partial u/\partial x + \partial v/\partial v$ ) 与广义位温垂直梯度∂θ\*/∂p的相互作用项。在暴 雨过程中,雨区上空的广义位温等值线通常呈漏斗 状从对流层中高层向对流层低层伸展,这主要是由 雨区上空水汽和温度的特殊垂直分布结构造成的; 漏斗两侧的湿等熵面倾斜陡峭, 广义位温等值线密 集,其水平梯度比较明显,代表雨区上空存在明显 的热力不连续面;在漏斗的底部,原来近水平方向 分布的平直广义位温等值线在漏斗的挤压下向下 凹,变得更加密集,其垂直梯度也相应地增大。因 此,标量J把水平风场的垂直切变、广义位温的水 平梯度、水平散度、广义位温的垂直梯度等动力因 素和热力因素有机地结合起来,可以综合地表征暴 雨过程中雨区上空风场垂直切变和低层辐合高层辐 散的动力学结构特征以及湿等熵面呈漏斗状向下伸 展的热力学结构特征。

(5) 式还可以写成如下形式,

$$J = \frac{\partial}{\partial x} \left( u \, \frac{\partial \theta^*}{\partial p} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( v \, \frac{\partial \theta^*}{\partial p} \right) - \frac{\partial}{\partial p} \left( u \, \frac{\partial \theta^*}{\partial x} + v \, \frac{\partial \theta^*}{\partial y} \right). \tag{6}$$

(6) 式右端前两项代表热力学属性(广义位温垂直 梯度)的水平通量散度,第三项代表热力水平平流 的垂直梯度。对于边界没有流入和流出的闭合系 统,上式的垂直积分可以写为:

$$\iint_{V} J \, \mathrm{d}x \mathrm{d}y \mathrm{d}p = -\iint_{\sigma} \left( u \, \frac{\partial \theta^*}{\partial x} + v \, \frac{\partial \theta^*}{\partial y} \right) \mathrm{d}x \mathrm{d}y \Big|_{\rho_s}^{\rho_t}, \quad (7)$$

可见,闭合系统(V)内的标量 J 代表系统顶部 (*p*<sub>t</sub>)水平面积(σ)积分的热力水平平流与系统底 部(*p*<sub>s</sub>)水平面积(σ)积分的热力水平平流之差。

(5) 式还可以进一步写为

$$J = \left[ \nabla \times (\mathbf{v}_{\rm h} \times \mathbf{k}) \right] \cdot \nabla \theta^* , \qquad (8)$$

其中, $v_h = (u,v,0)$  为水平速度矢量。(8) 式表明标 量 J本质上是一种位涡,不同于 Ertel 位涡(( $\nabla \times v_h$ )· $\nabla \theta^*$ ),这种位涡是由水平风矢量旋转 90°后的 旋度与广义位温梯度的点乘构成的,代表水平风矢 量旋转 90°后的旋度在广义位温梯度方向上的投 影;另一方面,Ertel 位涡包含了相对垂直涡度( $\partial v/\partial x - \partial u/\partial y$ )的作用,而J 不含相对垂直涡度, 但引入了水平散度( $\partial u/\partial x + \partial v/\partial y$ )的效应。 由于雨区与非雨区上空动力学和热力学的结构 特征存在明显区别,因此,标量 J 在雨区应该表现 为强信号,而在非雨区应该表现为弱信号,所以, 为了突出强调这种信号的强度,我们进一步定义标 量 J 的绝对值为热力切变平流参数,即

$$\mid J \mid = \sqrt{J^2}.$$
 (9)

在下面的诊断分析中,我们将利用该参数诊断分析 暴雨过程中雨区上空动力学和热力学的结构特征。

为了进一步分析影响热力切变平流参数发展演 变的主要因素,我们推导了该参数的倾向方程,具 体推导过程如下:

首先, 对 (9) 两端求关于 t 的偏导数, 然后利 用等式  $\partial(J/|J|)/\partial t=0$  和 $\nabla(J/|J|)=0$ , 可以得 到

$$\frac{\partial |J|}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[ \frac{J}{|J|} \left( \frac{\partial u}{\partial t} \frac{\partial \theta^*}{\partial p} + u \frac{\partial^2 \theta^*}{\partial p \partial t} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ \frac{J}{|J|} \left( \frac{\partial v}{\partial t} \frac{\partial \theta^*}{\partial p} + v \frac{\partial^2 \theta^*}{\partial p \partial t} \right) \right] - \frac{\partial}{\partial p} \left[ \frac{J}{|J|} \cdot \left( \frac{\partial u}{\partial t} \frac{\partial \theta^*}{\partial x} + u \frac{\partial^2 \theta^*}{\partial x \partial t} + \frac{\partial v}{\partial t} \frac{\partial \theta^*}{\partial y} + v \frac{\partial^2 \theta^*}{\partial y \partial t} \right) \right]. (10)$$

把等压坐标系中f平面近似下的水平动量方程

$$\frac{\mathrm{d}u}{\mathrm{d}t} - f_v = -\frac{\partial\phi}{\partial x},\tag{11}$$

$$\frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}t} + fu = -\frac{\partial\phi}{\partial y},\tag{12}$$

和广义位温方程(3)代人方程(10),并利用质量 连续性方程(4),可以推导出如下通量形式的热力 切变平流参数倾向方程,

$$\frac{\partial \mid J \mid}{\partial t} = \nabla \cdot \mathbf{F} + S, \qquad (13)$$

其中,

$$\boldsymbol{F} = \boldsymbol{F}_1 + \boldsymbol{F}_2 + \boldsymbol{F}_3, \qquad (14)$$

$$\boldsymbol{F}_1 = -\boldsymbol{v} \mid \boldsymbol{J} \mid, \qquad (15)$$

$$\mathbf{F}_{2} = 2\theta^{*} \left( \nabla u \times \nabla v \right) \frac{J}{\mid J \mid}, \qquad (16)$$

$$\mathbf{F}_{3} = f\theta^{*} \left( \nabla \times \mathbf{v}_{ha} \right) \frac{J}{\mid J \mid}, \qquad (17)$$

$$S = -\nabla \cdot \left(\frac{J}{\mid J \mid} S_{\theta^*} \; \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial p}\right). \tag{18}$$

在 (17) 式中,  $v_{ha} = (u_a, v_a, 0)$  为非地转风矢量,  $u_a = u + (1/f) \partial \phi / \partial y$  和  $v_a = v - (1/f) \partial \phi / \partial x$  分别为 x 和 y 方向的非地转风分量。

方程(13)的左端为热力切变平流参数的局地 变化项,右端第一项为通量散度项,右端第二项为 非绝热加热和水汽相变构成的热力切变平流参数源 汇项。在式 (14)中F为三维矢量,由三部分组成, 其中 $F_1$ 为热力切变平流参数的通量,代表三维风 速矢量对热力切变平流参数的通量输送; $F_2$ 为水 平风速空间梯度的耦合项,代表纬向风速切变与经 向风速切变的相互作用对|J|局地变化的影响; $F_3$ 为非地转风涡度( $\nabla \times v_{ha}$ )项,代表非地转风旋转 对|J|发展演变的贡献。在下面的诊断分析中,本 文通过计算(13)式通量散度项 $\nabla \cdot F$ 来诊断影响 |J|局地变化的主要因素。

#### 3 诊断分析

针对 2007 年 7 月 17~21 日发生在我国中东部 地区的一次暴雨过程和 2008 年 1 月 29 日~2 月 3 日发生在我国华南地区的冰冻雨雪天气过程,本文 利用 NCEP/NCAR 全球最终分析资料(水平分辨 率为 1°×1°,垂直层数为 26 层,时间间隔为 6 小 时)对热力切变平流参数进行计算,分析雨区上空 热力切变平流参数所表征的动力学和热力学性质以 及影响热力切变平流参数发展演变的主要因素。

### 3.1 热力切变平流参数的空间分布和时间演变特 征分析

2007 年 7 月 17~21 日亚洲中高纬地区的环流 形势调整为一槽一脊型(图略),脊区位于乌拉尔 山地区,低槽位于贝加尔湖地区,随着高压脊的减 弱东移,贝加尔湖冷涡也随之东移南下,受其影 响,我国中东部地区及东北地区出现大范围的暴 雨。

如图 1 所示, 2007 年 7 月 18 日 12 时 (协调世 界时,下同) 在沿着 115°E 的经向垂直剖面内,观 测的 6 小时累积地面降水主要集中在纬度带 35°N~ 38°N内。在 250 hPa 等压面以下高度和以上高度, 标量 J 的异常值区可以分成两部分,其中 250 hPa 等压面以下高度的异常值区主要呈现柱状,位于地 面强降水区的上空,这部分异常值区主要由  $J_1 = [(\partial u/\partial p) \partial \theta^* / \partial x + (\partial v/\partial p) \partial \theta^* / \partial y)]$ 和  $J_2 = (\partial u/\partial x + \partial v/\partial y) \partial \theta^* / \partial p$ 的共同作用引起,其中  $J_1$ 的异常值区主要位于降水区上空略偏北的对流层中 低层,主要表现为负值;  $J_2$ 的异常值区主要位于降 水区上空的对流层低层,主要表现为正值,该正值



图 1 2007 年 7 月 18 日 12 时 (a) J<sub>1</sub>、(b) J<sub>2</sub> 和 (c) J 在沿着 115°E 的经向一垂直剖面内的分布 (单位: 10<sup>-8</sup> K·Pa<sup>-1</sup>·s<sup>-1</sup>)。直方图: 观测的 6 小时累积地面降水 (下同)

Fig. 1 The meridional – vertical cross sections of (a)  $J_1$ , (b)  $J_2$ , and (c) J along 115°E at 1200 UTC 18 Jul 2007 (units:  $10^{-8} \text{ K} \cdot \text{Pa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ). The thin bar denotes the observation of 6-h accumulative surface rainfall (the same below)

区主要由低层大气的水平辐合  $(\partial u/\partial x + \partial v/\partial y < 0)$ 和湿等熵面漏斗形状的底部及北侧广义位温等值线 密集  $(\partial \theta^* / \partial p < 0)$  共同作用造成。在 250 hPa 等 压面以上高度,标量 J 的异常值区范围很广,主要 是由  $J_2$  造成的,这是因为那里的广义位温等值线 相对比较平直,而且在垂直方向上非常密集,以至 于其垂直梯度非常显著。

标量 J 绝对值 (即热力切变平流参数)的垂直 分布结构如图 2 所示,在沿着 115°E 的经向垂直剖 面内,热力切变平流参数的高值区主要位于 250 hPa 等压面以上的对流层高层,其等值线相对比较平 缓,并且在垂直方向上非常密集,这主要是由那里 广义位温等值线比较平直、垂直梯度比较显著的分 布结构造成的。在 250 hPa 等压面以下高度,热力 切变平流参数的异常值区基本上呈现柱状,位于地 面强降水区的上空,从对流层高层的高值区向下伸 展,直至地面强降水区上空的近地面层,并且正高 值中心主要出现在 600 hPa 以下对流层中低层。如 图 2a 所示,2007 年 7 月 18 日 06 时,37.5°N 附近 存在非常微弱的地面降水,其上空存在较弱的柱状 [*J*]异常值区,从对流层高层的高值区向下伸展到 大约 700 hPa 高度附近; 18 日 12 时, 地面降水量 增大,地面雨区主要位于纬度带 35.5°N~38°N 内, 同时雨区上空的柱状 [J] 异常值区进一步向下伸展 到 950 hPa 高度附近,其强度也相应地增强,两个 正高值中心分别位于 700 hPa 和 850 hPa 高度附近; 18日18时,地面雨区向南移动到纬度带33.5°N~ 36°N内, 地面降水量进一步增大, 雨区上空对应着 向下伸展到近地面层的柱状 | J | 异常值区, 两个正 高值中心的垂直高度进一步向下移动:19日00时, 地面降水量减少,地面雨区的范围已经收缩,位于 纬度带 33.5°N~35°N内,雨区上空依然存在向下 伸展到近地面层的柱状 [J] 异常值区, 只有一个高 值中心,位于900 hPa 高度附近,但其强度进一步 明显增强。这些分析表明,对流层中低层的热力切 变平流参数异常值区呈向下伸展的柱状,主要位于 地面雨区的上空,综合地表征了雨区上空水平风速 的垂直切变和水平散度的动力学特征以及湿等熵面 漏斗状向下伸展的热力学垂直结构特征。

热力切变平流参数的空间水平分布如图 3 所



图 2 2007 年 7 月热力切变平流参数在沿着 115℃的经向一垂直剖面内的分布 (单位: 10<sup>-8</sup> K・Pa<sup>-1</sup>・s<sup>-1</sup>): (a) 18 日 06 时; (b) 18 日 12 时; (c) 18 日 18 时; (d) 19 日 00 时

Fig. 2 The meridional – vertical cross sections of thermodynamic shear advection parameter  $(10^{-8} \text{ K} \cdot \text{Pa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1})$  along  $115^{\circ}\text{E}$  at (a) 0600 UTC 18, (b) 1200 UTC 18, (c) 1800 UTC 18, and (d) 0000 UTC 19 Jul 2007

示,2007年7月18日18时观测的6小时累积地面 降水主要出现在两个地区,一是主要位于我国辽宁 省和吉林省以及朝鲜半岛北部的雨区(简称北侧雨 区);另一个是位于我国中东部地区的雨区,基本 上呈东北一西南走向的带状分布,从陕西省西南部 向东北方向伸展到山东半岛。|J|的异常值区也呈 东北一西南走向的带状,覆盖着这两个雨区;降水 区内的|J|表现为强信号,而在非降水区,|J|的数 值相对较小,表现为弱信号。19日00时,北侧雨 区收缩东移,河南东部和山东中西部的雨带减弱南 移,河南西部的雨带向北抬升,同时|J|的异常值 区依然保持带状,覆盖着这两块地面雨区,并且伴 随着中东部雨带向南移动,但其经向范围略宽于观 测的雨带。随后,我国东北地区和朝鲜半岛北部的 雨区逐渐减弱消失,覆盖其上的|J|异常值区也相 应地收缩减弱。我国中东部地区的雨带逐渐向南移 动,|J|异常值区也相应地南移,并且雨区始终位 于|J|的异常值区之内。上述分析表明,热力切变 平流参数的异常值区与观测雨带的落区和走向基本 一致,该参数在雨区内表现为强信号,而在非雨区



图 3 2007 年 7 月 950~650 hPa 垂直积分的热力切变平流参数的水平分布 (单位: 10<sup>-4</sup> K/s): (a) 18 日 18 时; (b) 19 日 00 时; (c) 19 日 06 时; (d) 19 日 12 时; (e) 19 日 18 时; (f) 20 日 00 时。阴影: 观测的 6 小时累积地面降水 (单位: mm) (下同) Fig. 3 The horizontal distribution of thermodynamic shear advection parameter (10<sup>-4</sup> K/s) vertically integrated from 950 hPa to 650 hPa at (a) 1800 UTC 18, (b) 0000 UTC 19, (c) 0600 UTC 19, (d) 1200 UTC 19, (e) 1800 UTC 19, and (f) 0000 UTC 20 Jul 2007. The gray shade denotes the observation of 6-h accumulative surface rainfall (the same below)

表现为弱信号,这说明热力切变平流参数能够刻画 雨区上空水平风速切变和广义位温的垂直结构特 征,因而与地面雨区存在一定的对应关系。

这里需要指出的是,由于 NCEP/NCAR 全球 最终分析资料的空间分辨率比较低,时间间隔较 长,缺乏足够的中小尺度系统的信息,因而热力切 变平流参数对某些空间范围较小的局地性降水的描 述并不理想。这同时也说明,用这种资料计算的热 力切变平流参数适合描述空间范围较大的系统性降 水,而不适合表征空间范围较小的局地性很强的降水。

热力切变平流参数的时间演变趋势如图 4 所 示,18日18时在沿着115°E的经向时间剖面内, |J|的异常值区和强降水区大约位于 41°N 附近;随 后二者一起向南移动, 20 日 00 时移至 34°N 附近。 在整个研究时段内, |J|的异常值区始终覆盖在地 面雨区之上,二者的时间演变趋势比较相似,并且 在雨区内|J|表现为强信号,而在非雨区|J|表现为 弱信号。这进一步表明, 热力切变平流参数能够描 述暴雨过程中雨区上空动力场和热力场典型的垂直 结构特征,在时间演变趋势上,与地面雨区的发展 移动存在一定的对应关系。值得注意的是, | J | 的 高值中心与强降水中心并不完全一一对应,这主要 是因为降水过程是一个复杂的云微物理过程,而 |J|描述的是宏观动力学和热力学过程,二者没有 直接联系, 而是通过第三方联系起来的; 因此虽然 [*I*]的异常值区与观测的地面雨区可以非常接近, 但二者不可能完全一致。

2007 年 7 月 17~21 日暴雨过程的分析表明, 热力切变平流参数因为能够比较准确地表征暴雨过 程中雨区上空动力场和热力场典型的垂直结构特征 而与观测的 6 小时累积地面降水区建立良好的对应 关系。为了进一步验证这种对应关系在其它强降水 过程中也存在,本文利用 NCEP/NCAR 全球最终 分析资料,对 2008 年 1 月 29 日~2 月 3 日发生在 我国南方地区大范围的冰冻雨雪天气进行类似的诊 断分析。

如图 5 所示,2008 年 2 月 1 日 12 时在沿着 110°E 的经向垂直剖面内,观测的 6 小时累积地面 降水主要集中在纬度带 22°N~28°N 内。250 hPa 等压面以上高度的标量 J 异常值区主要是由 J<sub>2</sub> 造 成的,这主要与那里密集的广义位温等值线分布有 关。在 250 hPa 等压面以下高度,标量 J 的异常值



1207

图 4 2007 年 7 月 17 日 00 时~21 日 00 时 (950 ~ 650 hPa) 垂直积分的热力切变平流参数在沿着 115°E 经向一时间剖面内 的分布 (单位: 10<sup>-4</sup> K/s).

Fig. 4 The temporal variation of thermodynamic shear advection parameter ( $10^{-4}$  K/s) vertically integrated from 950 hPa to 650 hPa along  $115^{\circ}$ E during the period of 0000 UTC 17 Jul – 0000 UTC 21 Jul 2007

区主要呈现正负值相间的倾斜柱状,从地面强降水 区上空的对流层中高层倾斜向下伸展到地面雨区南 侧的近地面层,其中近地面层标量 J 的负高值区主 要是由 J<sub>1</sub> 决定的,而强降水区上空对流层中低层 标量 J 的正高值区主要来自于 J<sub>2</sub>。

如图 6 所示, 2008 年 2 月 1 日 12 时和 18 时在 沿着 110°E 的经向垂直剖面内,强降水区维持在纬 度带  $22^{\circ}N \sim 28^{\circ}N$  内, |J| 的异常值区主要位于 250 hPa 以上高度,并且等值线密集,这点与前面的 暴雨个例分析结果相同:在 250 hPa 以下高度, |I|的异常值区呈倾斜的柱状,从雨区上空对流层高层 |J|的高值区向下向南倾斜伸展,直至紧邻地面雨 区南侧的近地面层;近地面层的|J|高值中心位于 地面雨区的南侧,而不是出现在雨区的上空,这点 明显地不同于前面的暴雨个例;从总体上看,虽然 向下倾斜伸展的|J|柱状结构的末端紧邻地面雨区 的南侧,但其柱状结构的主体还是基本上位于雨区 的上空。这种倾斜的[J]柱状结构主要是与雨区上 空的水平风速切变、广义位温等动力场和热力场的 倾斜垂直结构有关。2日00时,地面雨区减弱南移 至纬度带 21.5°N~26°N 内, 跨越其上空的 |J|柱 状异常值区也相应地向南移动;2日06时,地面雨 区进一步南移至纬度带 21°N~23°N 内, 地面降水



图 5 2008 年 2 月 1 日 12 时 (a)  $J_1$ 、(b)  $J_2$ 、(c) J 在沿着 110°E 的经向一垂直剖面内的分布(单位:  $10^{-8}$  K·Pa<sup>-1</sup>·s<sup>-1</sup>) Fig. 5 The meridional – vertical cross sections of (a)  $J_1$ , (b)  $J_2$ , and (c) J along 110°E at 1200 UTC 1 Feb 2008 (units:  $10^{-8}$  K·Pa<sup>-1</sup>·s<sup>-1</sup>)



图 6 2008 年 2 月热力切变平流参数在沿着 110°E 的经向一垂直剖面内的分布(单位: 10<sup>-8</sup> K·Pa<sup>-1</sup>·s<sup>-1</sup>): (a) 1 日 12 时; (b) 1 日 18 时; (c) 2 日 00 时; (d) 2 日 06 时

Fig. 6 The meridional-vertical cross sections of thermodynamic shear advection parameter  $(10^{-8} \text{ K} \cdot \text{Pa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1})$  along  $110^{\circ}\text{E}$  at (a) 1200 UTC 1 Feb, (b) 1800 UTC 1 Feb, (c) 0000 UTC 2 Feb, and (d) 0600 UTC 2 Feb 2008

量大幅减少,与之相伴随的倾斜的|J|柱状异常值 区也明显地减弱。这些分析表明,跨越雨区上空的 倾斜|J|柱状异常值区综合表征了雨区上空水平风速 的垂直切变和水平散度的动力学特征和湿等熵面漏 斗状向下伸展的热力学倾斜垂直分布的结构特征。

从热力切变平流参数的水平分布来看(如图 7 所示),2008年2月1日06时~2日12时观测的6 小时累积地面强降水区主要位于我国的华南地区, 大体上呈东北一西南走向的带状分布,随时间逐渐 向东南方向移动,在2日12时移至东南沿海地区, 地面降水量明显地减弱。|J|异常值区也主要表现 为带状,完全覆盖着地面雨区,在位置和走向上与 雨区基本上一致,雨区内的|J|表现为强信号,而 非雨区内的|J|表现为弱信号。|J|的水平分布范 围比地面雨区要宽广。造成这种情况主要有两个原 因:第一,该降雪过程的垂直速度、涡度、散度等 动力场以及温度、广义位温等热力场在垂直方向上 都是从近地面层向对流层高层向北倾斜分布的(图 略),这种特殊的倾斜垂直结构造成|J|的异常值区 呈现跨雨区分布的垂直倾斜伸展的柱状结构,这样

1209



图 7 2008年2月850~500 hPa 垂直积分的热力切变平流参数的水平分布(单位: 10<sup>-4</sup> K/s): (a) 1日06时; (b) 1日12时; (c) 1日18时; (d) 2日00时; (e) 2日06时; (f) 2日12时

Fig. 7 The horizontal distribution of thermodynamic shear advection parameter  $(10^{-4} \text{ K/s})$  vertically integrated from 850 hPa to 500 hPa at (a) 0600 UTC 1 Feb, (b) 1200 UTC 1 Feb, (c) 1800 UTC 1 Feb, (d) 0000 UTC 2 Feb, (e) 0600 UTC 2 Feb, and (f) 1200 UTC 2 Feb 2008

导致垂直积分的 | J | 异常值区范围略大于地面雨 区; 第二, 本文所用的 NCEP/NCAR 全球最终分 析资料的空间分辨率和时间分辨率比较低也是造成



图 8 2008 年 1 月 29 日 00 时~ 3 日 00 时 (850~500 hPa) 垂 直积分的热力切变平流参数在沿着 110°E 经向一时间剖面内的 分布 (单位: 10<sup>-4</sup> K/s)

Fig. 8 The temporal variation of thermodynamic shear advection parameter ( $10^{-4}$  K/s) vertically integrated from 850 hPa to 500 hPa along  $110^{\circ}$ E during the period of 0000 UTC 29 Jan – 0000 UTC 3 Feb 2008

热力切变平流参数的异常值区与观测的地面雨带在空间位置上存在差异的一个因素。

在时间演变趋势上(如图 8 所示),2008 年 1 月 29 日 00 时~3 日 00 时观测的地面雨区主要位 于纬度带 21°N~27°N内,其中 2008 年 2 月 1~2 日地面降水量比较大。在整个研究时段内,|J|的 异常值区始终覆盖着地面雨区,热力切变平流参数 与观测的地面雨带在时间演变趋势基本上一致,1 月 29 日 00 时,二者从 21°N 开始向北移动,2 月 1 日 18 时二者北移至大约 25°N 附近,地面降水量增 大,|J|的强度也相应地增加。同时需要指出的是, |J|异常值区的经向范围略宽于观测的地面雨区, 其原因在前面已经给出。

#### 3.2 影响热力切变平流参数发展演变的因素分析

为了分析影响热力切变平流参数发展演变的主要因素,本文以 2007 年 7 月 17~21 日发生在我国 华东地区的暴雨过程为例,利用 NCEP/NCAR 全 球最终分析资料对方程 (13) 中的通量散度项 $\nabla \cdot F$ 及其三个组成部分 $\nabla \cdot F_1$ 、 $\nabla \cdot F_2$  和 $\nabla \cdot F_3$  进行计 算;由于本文所用资料的时间分辨率比较低,并且 包含的非绝热加热和水汽相变等相关信息比较少,



 $\mathbf{K} \cdot \mathbf{P} \mathbf{a}^{-1} \cdot \mathbf{s}^{-1}$ )

Fig. 9 The meridional – vertical cross sections of (a)  $\nabla \cdot \mathbf{F}$ , (b)  $\nabla \cdot \mathbf{F}_1$ , (c)  $\nabla \cdot \mathbf{F}_2$ , and (d)  $\nabla \cdot \mathbf{F}_3$  along 115°E at 1200 UTC 18 July 2007 (units:  $10^{-12} \text{ K} \cdot \text{Pa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ )

因此本文没有计算方程(13)中热力切变平流参数 的局地变化项和源汇项。

如图 9 所示, 2007 年 7 月 18 日 12 时在沿着 115°E 的经向垂直剖面内存在三个 $\nabla \cdot F$  的异常值 区,其中一个异常值区位于 250 hPa 以上高度的对 流层高层,这与那里的热力切变平流参数正高值区 相对应;另两个 $\nabla \cdot F$  的异常值区分别位于地面雨 区上空对流层中低层 600 hPa 和 900 hPa 高度附 近,分别与两个热力切变平流参数正高值中心相对 应,这两个正负高值区分别表征 600 hPa 高度附近 的通量散度促进热力切变平流参数的发展和 900 hPa 高度 附近的 通量 散度 削弱热力切变 平流参数。 250 hPa 以上高度对流层高层也是 $\nabla \cdot F$  的三个组成 部分 $\nabla \cdot F_1$ 、 $\nabla \cdot F_2$ 和 $\nabla \cdot F_3$ 的异常值区,但 $\nabla \cdot F_3$ 的强度是最大的,因此对流层高层的 $\nabla \cdot F$ 异常值 区主要是由 $\nabla \cdot F_3$ 造成的,表明非地转风位涡在对 流层高层对热力切变平流参数的发展演变有重要影 响。在 250 hPa 以下高度的对流层中低层, $\nabla \cdot F$ 的三个组成部分的异常值区主要位于地面雨区的上 空,600 hPa 高度附近的 $\nabla \cdot F_1$  和 $\nabla \cdot F_3$  主要表现 为正值,它们共同造成了 600 hPa 高度附近的 $\nabla \cdot F$ 正高值区,这说明那里的热力切变平流参数的通量 散度和非地转风涡度对热力切变平流参数的发展变 化有显著影响。在 900 hPa 高度附近 $\nabla \cdot F_1$ 、 $\nabla \cdot F_2$ 和 $\nabla \cdot F_3$ 都表现为负值,虽然三者对 900 hPa 高度 附近 $\nabla \cdot F$ 负高值区都有贡献,但 $\nabla \cdot F_1$ 和 $\nabla \cdot F_2$ 的 贡献大一些,这说明热力切变平流参数的通量散度 和水平风速相互作用项是影响对流层低层热力切变 平流参数演变的主要因素。

在沿着 115°E 的经向时间剖面内 (如图 10 所



图 10 2007 年 7 月 17 日 00 时~21 日 00 时 (950~650 hPa) 垂直积分 (a) ∇ · **F**、(b) ∇ · **F**<sub>1</sub>、(c) ∇ · **F**<sub>2</sub> 和 (d) ∇ · **F**<sub>3</sub> 在沿着 115°E 经 向一时间剖面内的分布 (单位: 10<sup>-8</sup> K/s<sup>2</sup>)

Fig. 10 The temporal variations for (a)  $\nabla \cdot \mathbf{F}$ , (b)  $\nabla \cdot \mathbf{F}_1$ , (c)  $\nabla \cdot \mathbf{F}_2$ , and (d)  $\nabla \cdot \mathbf{F}_3$  vertically integrated from 950 hPa to 650 hPa along 115°E during the period of 0000 UTC 17 Jul - 0000 UTC 21 Jul 2007 (units:  $10^{-8} \text{ K/s}^2$ )

示),  $\nabla \cdot \mathbf{F}$ 的异常值区呈带状分布, 主要位于 2007 年7月18日00时~20日12时的纬度带31°N~ 39°N内,覆盖着地面雨区,并伴随着雨区向南移 动,表现为强信号,而在非雨区, $\nabla \cdot F$ 的数值相对 较小,表现为弱信号,这表明通量散度项在地面雨 区内引起热力切变平流参数的剧烈变化。在18日 00 时~18 时和 20 日 00 时~21 日 00 时的两个降 水时段内,覆盖雨区的 $\nabla \cdot F$ 为较强的负值,表明该 雨区内的 F 是辐合的, 倾向于削弱热力切变平流参 数,抑制降水系统的发展;而在18日12时~20日 12 时降水时段内,覆盖雨区的 $\nabla \cdot F$  表现为较强的 正值, 表明该雨区内的 F 是辐散的, 有利于热力切 变平流参数的增长,促进降水系统的发展。虽然,  $\nabla \cdot F_1$ 、 $\nabla \cdot F_2$ 和 $\nabla \cdot F_3$ 的异常值区也都覆盖着地面 雨区,但它们对热力切变平流参数发展演变的贡献 是不同的。在 18 日 00 时~20 日 12 时降水时段 内, $\nabla \cdot \mathbf{F}$  先是削弱雨区内热力切变平流参数,然 后再促进雨区内热力切变平流参数的增长; $\nabla \cdot F_2$ 的贡献与 $\nabla \cdot \mathbf{F}_1$ 类似,先是抑制,然后促进,最后 再抑制热力切变平流参数的增长; $\nabla \cdot F_3$ 的影响不 同于 $\nabla \cdot \mathbf{F}_1$ 和 $\nabla \cdot \mathbf{F}_2$ ,在18日12时~19日00时降 水时段内促进热力切变平流参数的发展,在19日 00 时~20 日 12 时降水时段内抑制热力切变平流参 数的发展。总地来看,在18日00时~18时时段内  $\nabla \cdot \mathbf{F}$ 的负值区和 19 日 00 时~20 日 00 时时段内 $\nabla \cdot \mathbf{F}$ 的正值区主要是 $\nabla \cdot F_1$  与 $\nabla \cdot F_2$  引起的, 18 日 12 时~19 日 00 时时段内的∇·F 正值区和 20 日 00 时~12 时时段内 $\nabla \cdot \mathbf{F}$ 的负值区主要是由 $\nabla \cdot \mathbf{F}_2$ 和  $\nabla \cdot F_3$ 造成的。可见,在整个降水时段内, $\nabla \cdot F_2$ 对 热力切变平流参数发展演变都有一定的影响。

#### 4 结论与讨论

在以往暴雨诊断分析研究的基础上,本文把对 流涡度矢量垂直分量和水平散度与广义位温垂直梯 度的耦合项联合起来,提出了热力切变平流参数的 概念,并在等压坐标系中建立了热力切变平流参数 的倾向方程。由于热力切变平流参数把水平风场的 垂直切变、广义位温的水平梯度、水平散度、广义 位温的垂直梯度等动力因素和热力因素有机地结合 起来,因而可以综合地表征暴雨过程中雨区上空风 场垂直切变和低层辐合高层辐散的动力学结构特征 和湿等熵面呈漏斗状向下伸展的热力学结构特征。 本文利用 NCEP/NCAR 全球最终分析资料对 两次强降水过程中热力切变平流参数的空间分布和 时间演变特征进行诊断分析。结果表明,该参数能 够综合刻画地面雨区上空动力场和热力场的典型垂 直结构特征,而这种典型的垂直结构与地面降水联 系紧密,因此热力切变平流参数与降水系统的发展 演变密切相关;垂直积分的热力切变平流参数的异 常值区与观测的6小时累积地面降水区相对应,它 们的空间分布特征和时间演变趋势比较相似。本文 对影响热力切变平流参数发展演变的因素进行分 析,结果表明该参数倾向方程中通量散度项的异常 值区主要发生在地面雨区上空对流层的中下层,强 迫那里的热力切变平流参数发生变化,在整个降水 时段内,纬向风速与经向风速的相互作用对热力切 变平流参数发展演变都有一定的影响。

本文的诊断结果仅能说明物理量"热力切变平 流参数"与 6 小时观测降水在固定的时刻在空间分 布上有一定的对应关系,而是否具有提前预报意义 还需进一步进行大量的诊断分析研究。热力切变平 流参数因为能够综合描述降水区上空典型的动力学 和热力学的垂直结构而与地面降水建立联系,在实 际降水过程中,如果这种典型的垂直结构能够提前 出现,那么该物理量就可以提前预报暴雨的落区, 而如果这种典型的垂直结构不能提前出现,而是出 现在暴雨发生过程中,那么该物理量就没有预报意 义。一般来说,这种典型的垂直结构引发暴雨的关系 比较复杂,是这种典型的垂直结构引发暴雨,还是 与暴雨伴随出现,还不能给出定论。

#### 参考文献 (References)

- 毕宝贵,刘月巍,李泽椿. 2005. 2002 年 6 月 8~9 日陕南大暴雨数 值模拟研究 [J]. 大气科学, 29 (5): 814-826. Bi Baogui, Liu Yuewei, Li Zechun. 2005. Numerical simulations of extremely heavy rain in the southern Shaanxi province during 8-9 June 2002 [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 29 (5): 814-826.
- 陈忠明,高文良,闵文彬,等. 2006. 湿位涡、热力学参数 CD 与涡 度、散度演化 [J]. 高原气象,25(6):983-989. Chen Zhongming, Gao Wenliang, Min Wenbin, et al. 2006. The effects of moist potential vorticity and thermodynamic parameter CD on evolution of vorticity and divergence [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 25(6):983-989.
- 程麟生,冯伍虎. 2001. "987" 突发大暴雨及中尺度低涡结构的分 析和数值模拟 [J]. 大气科学,25 (4): 465-478. Cheng Linsh-

eng, Feng Wuhu. 2001. Analyses and numerical simulation on an abrupt heavy rainfall and structure of a mesoscale vortex during July 1998 [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 25 (4): 465-478.

- 段廷扬, 邓国, 王东海. 2007. 广义湿位涡与暴雨落区预报的诊断 分析 [J]. 大气科学, 31 (6): 1301 - 1307. Duan Tingyang, Deng Guo, Wang Donghai. 2007. Diagnostic analysis of generalized moist potential vorticity and forecast of torrential rain region [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 31 (6): 1301-1307.
- Ertel H. 1942. Ein neuer hydrodynamischer wirbelsatz [J]. Meteorol. Zeitschr Braunschweigs, 6: 277 - 281.
- 高守亭, 雷霆, 周玉淑, 等. 2002. 强暴雨系统中湿位涡异常的诊断 分析 [J]. 应用气象学报, 13 (6): 662-670. Gao Shouting, Lei Ting, Zhou Yushu, et al. 2002. Diagnostic analysis of moist potential vorticity anomaly in torrential rain systems [J]. Quarterly Journal of Applied Meteorology (in Chinese), 13 (6): 662-670.
- Gao S, Ping F, Li X. 2004a. A convective vorticity vector associated with tropical convection: A two-dimensional cloud-resolving modeling study [J]. J. Geophys. Res., 109: D14106, doi: 10. 1029/2004JD004807.
- Gao S, Wang X, Zhou Y. 2004b. Generation of generalized moist potential vorticity in a frictionless and moist adiabatic flow [J]. Geophys. Res. Lett., 31; L12113, doi: 10.1029/2003GL019152.
- Gao S, Cui X, Zhou Y, et al. 2005. A modeling study of moist and dynamic vorticity vectors associated with two-dimensional tropical convection [J]. J. Geophys. Res., 110: D17104, doi: 10.1029/ 2004JD005675.
- Gao S, Li X, Tao W-K, et al. 2007. Convective and moist vorticity vectors associated with tropical oceanic convection: A three-dimensional cloud-resolving model simulation [J]. J. Geophys. Res., 112: D01105, doi: 10.1029/2006JD007179.

孙淑清,周玉淑. 2007. 近年来我国暴雨中尺度动力分析研究进展

[J]. 大气科学, 31 (6): 1171 - 1188. Sun Shuqing, Zhou Yushu. 2007. Advances in meso-scale dynamical analysis of torrential rain systems in recent years in China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 31 (6): 1171-1188.

- 王东海,杨帅,钟水新,等. 2009. 切变风螺旋度和热成风螺旋度在 东北冷涡暴雨中的应用 [J]. 大气科学, 33 (6): 1238 - 1246. Wang Donghai, Yang Shuai, Zhong Shuixin, et al. 2009. The application of shearing wind helicity and thermal wind helicity in northeastern cold vortex rainfall event [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 33 (6): 1238-1246.
- 吴国雄,蔡雅萍,唐晓箐. 1995. 湿位涡和倾斜涡度发展 [J]. 气象 学报,53 (4):387-405. Wu Guoxiong, Cai Yaping, Tang Xiaojing. 1995. Moist potential vorticity and slantwise vorticity development [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 53 (4): 387-405.
- 伍荣生,谈哲敏. 1989. 广义涡度与位势涡度守恒定律及应用 [J].
  气象学报,47 (4): 436 442. Wu Rongsheng, Tan Zhemin.
  1989. Conservative laws on generalized vorticity and potential vorticity and its application [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 47 (4): 436 442.
- 周玉淑,曹洁,王东海. 2007. 非均匀饱和广义湿位涡在暴雨分析 与预测中的应用 [J]. 应用气象学报,18(6),755-760. Zhou Yushu, Cao Jie, Wang Donghai. 2007. The application of generalized moist potential vorticity in non-uniformly saturated atmosphere to analyses and forecast of torrential rain [J]. Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese), 18(6): 755-760.
- 周玉淑. 2009. 广义湿位涡在江淮流域暴雨分析和预报中的应用 [J]. 大气科学, 33 (5): 1101 – 1110. Zhou Yushu. 2009. Application of generalized moist potential vorticity to analysis and forecast of the torrential rain over the Changjiang – Huaihe River basin [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 33 (5): 1101 – 1110.