

广义湿位涡与暴雨落区预报的诊断分析

段廷扬¹ 邓国^{2*} 王东海³

1 成都信息工程学院, 成都 610225

2 国家气象中心数值室, 北京 100081

3 中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室, 北京 100081

摘 要 探讨了广义湿位涡理论及其倾向方程在暴雨落区预报方面的可应用性, 为非均匀饱和广义湿位涡理论的业务应用提供了新的思路。资料诊断结果表明, 非均匀饱和大气中的广义湿位涡虽然不具有守恒性, 但由于其体现了实际大气的非均匀饱和特性, 尤其是水汽梯度效应的引入, 使得广义湿位涡的异常在对流层低层能比较清楚地反映出暴雨发生时的高水汽集成的特性和机制, 有效地反映出暴雨区以及暴雨落区的变化。

关键词 非均匀饱和 广义湿位涡 暴雨

文章编号 1006-9895 (2007) 06-1301-07

中图分类号 P457.6

文献标识码 A

Diagnostic Analysis of Generalized Moist Potential Vorticity and Forecast of Torrential Rain Region

DUAN Ting-Yang¹, DENG Guo², and WANG Dong-Hai³

1 Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225

2 National Meteorological Center, Beijing 100029

3 State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081

Abstract The authors discussed the possible application of generalized moist potential vorticity (GMPV) in non-uniformly saturated atmosphere and its tendency to location of torrential rain, which maybe provide a new thought for the operational application of the GMPV. The calculated results manifest that the GMPV is not a conservational variable, but it can reflect the non-uniformly saturated property in real atmosphere. Especially, the water vapor and its gradient effect can be manifested in the GMPV, which can indicate that the convergence mechanism of water vapor at lower levels and can reflect the characteristic and mechanism of high water vapor convergence when torrential rain occurs, and it would be used more widely to diagnose the structure and location of torrential rain systems in the future.

Key words non-uniformly saturated atmosphere, generalized moist potential vorticity, torrential rain

1 引言

我国地处东亚, 是暴雨多发的地带。早在 20 世纪 70 年代, 以陶诗言先生为首的气象学家们就

针对我国暴雨成灾的严重性, 对暴雨以及中小尺度系统的天气学特征及动力学进行了系统而全面的研究, 并把研究成果归纳总结在《中国之暴雨》^[1]一书中。几十年过去了, 随着数值模式和探测设备的不断

收稿日期 2007-05-30, 2007-07-12 收修定稿

资助项目 国家自然科学基金资助项目 40505009, 灾害天气国家重点实验室 2006 年开放课题 2006LASW05, 中国气象局武汉暴雨研究所暴雨开放基金项目 IHR2006K01, 中国科学院方向性项目 KZCX3-SW-225

作者简介 段廷扬, 男, 1944 年出生, 教授, 博士生导师, 主要从事亚洲季风和青藏高原天气动力学研究。E-mail: duanty@cuit.edu.cn

* 通讯作者 E-mail: deng719@cma.gov.cn

断改进,有关中国暴雨各个方面的研究都取得了长足的进步,但在暴雨预报准确率的提高方面还是有限。与暴雨发生相联系的湿空气是研究大气动力学问题的基本对象,但是,由于其微观物理过程的复杂性以及难以计算等问题,一直没有得到广泛的重视。暴雨的发生与大量水汽的输送和集聚密切相关,因此,对暴雨系统的研究必须要反映水汽场的特征,所以,如何准确地反映暴雨发生时期的水汽特征就成了湿空气动力学的主要研究内容之一。

在湿空气动力学的研究方面,在 20 世纪 70 年代,谢义炳^[2]就倡导开展了该方面的研究;之后,国内学者还从不同角度探讨了这方面的工作^[3~5]。国外有过很多湿空气动力学方面的研究: Tripoli 等^[6]检验了冰-水混合物的位温 θ_i 与位温相比,在大气深对流系统识别方面有一定的优势; Pointin^[7]强调了降水产生的热力影响,定义了湿相当位温 θ_q 替代模式计算里的温度或位温,并作出了实际模拟; Hauf 等^[8]则指出:只要从熵的角度出发,之前提出的多种形式的位温都可以用一个普适的量来表示,即熵温 θ_s ; Ooyama^[9, 10]把虚温 T_p 引入热力过程,并且考虑冰相作用,推导出相应的一套直接且具有一致性的动力热力准则,与微物理过程参数化相联系; Soriano 等^[11]为了分析冰晶对位涡变化可能产生的影响,沿用熵温 θ_s ,推出了一个广义的位涡 q_g 及其倾向方程,发现与冰晶有关的非均匀加热对对流系统的发生发展有影响; Schubert 等^[12]专门讨论了非静力、潮湿、有降水状况下湿大气的新位涡理论,他沿用的是 Ooyama^[10]提出的 θ_p 。最近, Bannon^[13]又提出了一套湿空气动力学方程组,试图为不久的将来实现完全摒弃物理过程参数化,仅仅从原始方程组的数值积分作短时乃至长期预报提供理论基础。他们的工作以及 Betts^[14]、Persson^[15]等工作,都是采用大量的变量和经验系数,以达到更准确地描述实际大气中干空气、水汽、水凝物或者液态水并存这种特性的目的。但是,这样势必会导致体现湿特征的新变量的物理意义模糊,且计算量加大,不能很方便地用到实际个例的计算中,推广应用受到极大限制。

最近, Gao 等^[16, 17]把一个与比湿相联系的变量(广义相当位温 θ^*)引入到热力框架中,充分体现了实际大气总处于绝对干与完全饱和之间的特性。这个变量的引入没有带来大量的其他变量,因

此用到实际业务应用中具有一定的优势。之后,又形成了一系列围绕着广义位温的动力临近预报方法,如广义湿位涡对高温高湿天气的识别与预测^[17],又如非均匀饱和大气中的里查森数的诊断^[18]等。实际观测表明,当仪器测得的实际大气相对湿度没有达到百分之百的时候,大气中局部区域可能已经有潜热释放了(一般开始于相对湿度达到 78%)^[19],以往对湿空气中热力过程的讨论和计算时,都是用完全饱和的湿空气位温 θ_e 来进行,但是,就算在暴雨发生时期,大气的相对湿度也不会达到 100%^[20, 21],台风中也是这样^[22, 23]。所以,如何考虑高湿大气还没有达到完全饱和就发生凝结潜热释放的现象,在以往对暴雨的研究中还没有充分体现出来。但是,引入广义位温 θ^* 后,它可以表示实际大气既不是处处干燥,也不是完全饱和的这样一种非均匀饱和特性,能很好地表征实际大气干湿共存的凝结可能性函数,因此,在此基础上进一步研究非均匀饱和大气的动力和热力过程才有物理意义。综上所述,本文将在已有研究基础上,重点探讨引入广义位温 θ^* 后得到的广义湿位涡及其异常在暴雨分析中的应用。

2 非均匀饱和和广义湿位涡

2.1 非均匀饱和和大气中的广义位温

Gao 等^[16]提出的广义位温 θ^* 的定义式是:

$$\theta^*(T, p) = \theta(T, p) \exp\left(\frac{Lq_s \cdot (q/q_s)^k}{c_{pm}T}\right),$$

其中, T 是大气温度, p 是气压, θ 是位温, q 和 q_s 分别是比湿和饱和比湿, L 和 c_{pm} 是单位质量的凝结潜热和湿空气的定压比热容, $(q/q_s)^k$ 称为凝结几率函数,是反映大气非均匀饱和特性的因子。

2.2 非均匀饱和和广义湿位涡异常及其与暴雨落区诊断

由于湿位涡在暴雨研究中有广泛应用,本节通过引进广义位温 θ^* 以及由此推导出的非均匀饱和和广义湿位涡方程,来讨论广义湿位涡的异常是否也可以像湿位涡那样对暴雨发生有指示意义^[24~26]。

把 θ^* 代入热力学方程后,可得广义热力方程

$$c_p \frac{T}{\theta^*} \frac{d\theta^*}{dt} = Q_d,$$

其中, c_p 是单位质量气体的定压比热容, Q_d 是非绝

热加热项。再结合涡度方程,最后可得到广义湿位涡的倾向方程^[16]:

$$\frac{dP_m}{dt} = \alpha(\nabla p \times \nabla \alpha) \cdot \nabla \theta^* + \alpha \zeta_a \cdot \nabla \left(\frac{\theta^*}{c_p T} Q_d \right) + \alpha \nabla \theta \cdot (\nabla \times \mathbf{F}),$$

在这个式子中, $P_m = \alpha \zeta_a \cdot \nabla \theta^*$ 就是本文将要讨论的广义湿位涡。考虑绝热无摩擦大气,可简化得到:

$$\frac{dP_m}{dt} = \alpha(\nabla p \times \nabla \alpha) \cdot \nabla \theta^*,$$

即:在绝热无摩擦大气中,非均匀饱和广义湿位涡异常主要是由于大气斜压性与广义位温梯度的相互作用造成的。进一步展开,可得

$$\frac{dP_m}{dt} = \frac{AP_m}{P_*},$$

其中,

$$A = \left[\frac{R_d}{p} \left(\frac{p}{p_0} \right)^{R_d/c_p} \right] (\nabla p \times \nabla \theta) \cdot \nabla \theta^*, P_* = \zeta_a \cdot \nabla \theta^*.$$

因此,由于斜压性与广义位温梯度的相互作用造成的广义湿位涡的生成作用就体现在 A 中。利用广义位温定义, A 可进一步写为

$$A = \frac{R_d}{c_p \rho p} \left[k \left(\frac{q}{q_s} \right)^{k-1} \frac{\theta^*}{\theta} \right] (\nabla p \times \nabla \theta) \cdot \nabla q.$$

从 A 的表达式可见,它主要由大气的斜压性以及水汽梯度所决定。也就是说,广义湿位涡已经把水汽梯度效应与大气动力过程联系起来。暴雨发生时,水汽在暴雨区有明显的集聚,与暴雨区之外的大范围区域之间会形成明显的水汽梯度,有 ∇q 明显增大,从而导致 A 的异常, A 的异常又会导致广义湿位涡 P_m 的异常。因此,广义湿位涡的异常生成将随 ∇q 的增大而增加。可见,在暴雨发生时期,即使空气还未完全达到饱和,只要水汽梯度 ∇q 增大,广义湿位涡也必定出现异常。而广义湿位涡的异常是否也可以类似于湿位涡那样作为暴雨天气发生的动力识别示踪物^[25~27],这将在下一节用实际暴雨两个例来讨论。

3 广义湿位涡异常与暴雨落区预报的诊断分析

依据上一节广义湿位涡理论可知,暴雨发生时的高湿环境以及一定的水汽梯度场的配置有利于广义湿位涡发生明显变化,因而暴雨天气的发生有利于广义湿位涡出现异常。这是理论上的分析,但

实际情况是否如此需要依据实际观测资料进行动力诊断。由于1999年6月下旬在长江流域发生了很强的降水(整个强梅雨期从6月21日到7月3日),本节将以此次持续性降水为例,在分析降水过程基础上,进行广义湿位涡异常和暴雨落区的动力诊断,其目的是考察广义湿位涡的异常与暴雨落区的关系。文中所用降水资料为气象台站观测24小时降水实况,广义湿位涡计算所用资料为NCEP/NCAR的 $1^\circ \times 1^\circ$ 格点分析资料。

为了比较暴雨区与广义湿位涡异常的配置是否一致,首先给出1999年6月下旬降水分布。图1为6月23日、27日、28日、30日的降水,从图上可见,雨带呈准纬向型分布,集中在长江流域沿线,特别是26日到30日,整个雨带基本上转为明显的纬向型,暴雨中心主要集中在长江中下游地区。因此,我们首先来看长江流域区域($27^\circ \text{N} \sim 30^\circ \text{N}$, $110^\circ \text{E} \sim 120^\circ \text{E}$)平均的广义湿位涡在整个强梅雨期间的变化,同时考察广义湿位涡出现异常的高度。从图2可见,在分析时段内的广义湿位涡正的大值区主要出现在对流层低层的850 hPa以下,异常中心集中在925~950 hPa之间,这与实际大气水汽主要集中在低层是一致的,表明广义湿位涡确实能反映暴雨发生期间的高水汽集中特征。同时,广义湿位涡出现正异常[最大异常中心达到1.5 PVU ($1 \text{ PVU} = 1.0 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{K} \cdot \text{kg}^{-1}$)],说明在暴雨期有 $(\nabla p \times \nabla \theta) \cdot \nabla q$ 为正值,这意味着在比湿梯度方向上的斜压性是一直维持着的。

从暴雨期间区域平均的广义湿位涡的时间变化来看,广义湿位涡在低层确实有异常出现,那么,它的异常区域是否与暴雨区分布一致?我们想利用广义湿位涡能综合反映暴雨系统动力、热力以及水汽效应的优势来进行暴雨落区分析。由图2可以看到,广义湿位涡的异常大值中心主要出现在925~950 hPa之间,所以以下对广义湿位涡的分布将在925 hPa等压面上进行。

图3是6月23日、27日、28日和30日925 hPa上广义湿位涡的水平分布,从图中可见,广义湿位涡的异常区主要集中在相对湿度大于80%的区域,异常中心更是主要集中在相对湿度在90%左右的地区,与理论分析结果是一致的。从图3a可见,广义湿位涡大于0.5 PVU的区域(图中阴影区)呈西南-东北走向,与雨带的分布(图1a)是一致的,其

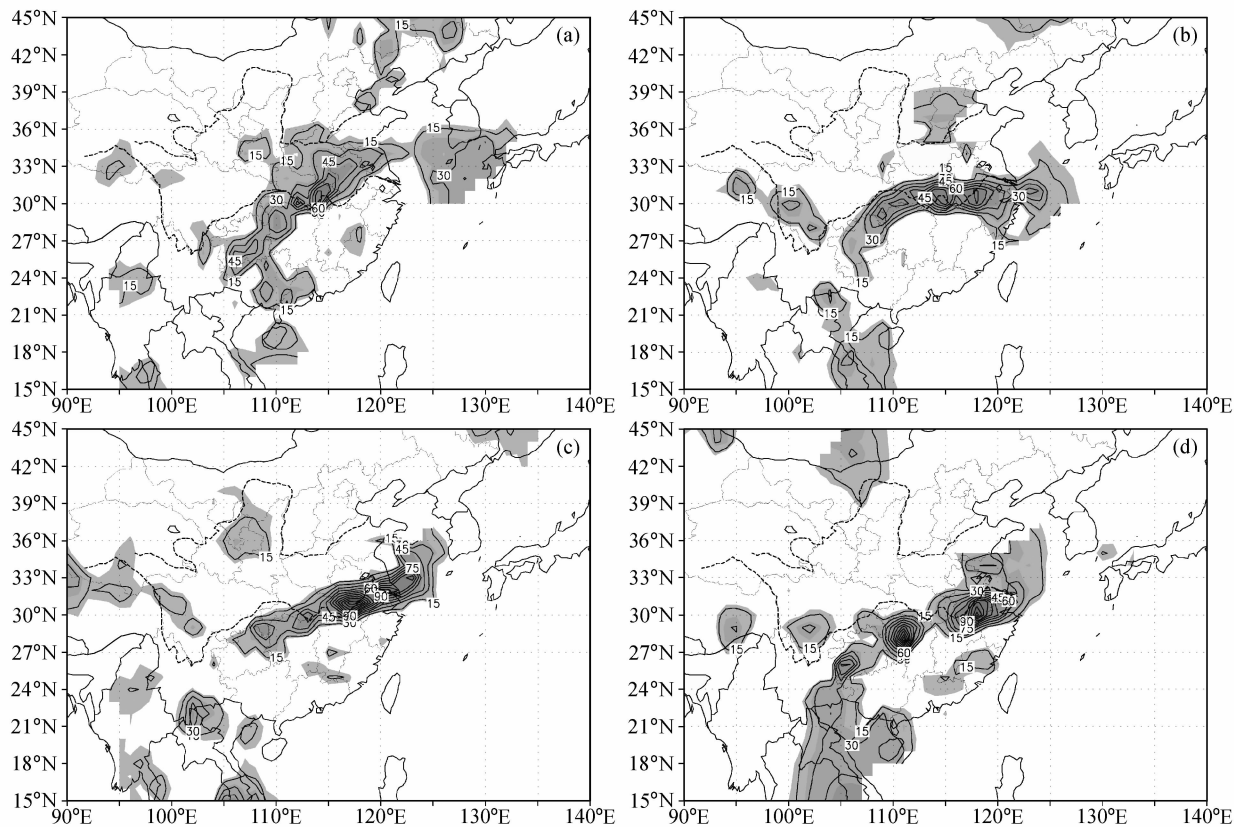


图1 1999年6月24小时观测降水(单位: mm): (a) 23日; (b) 27日; (c) 28日; (d) 30日。阴影区为降水大于10 mm的区域

Fig. 1 The observed 24 h rainfall (mm) on (a) 23 Jun, (b) 27 Jun, (c) 28 Jun, (d) 30 Jun 1999. The areas with rainfall more than 10 mm are shaded

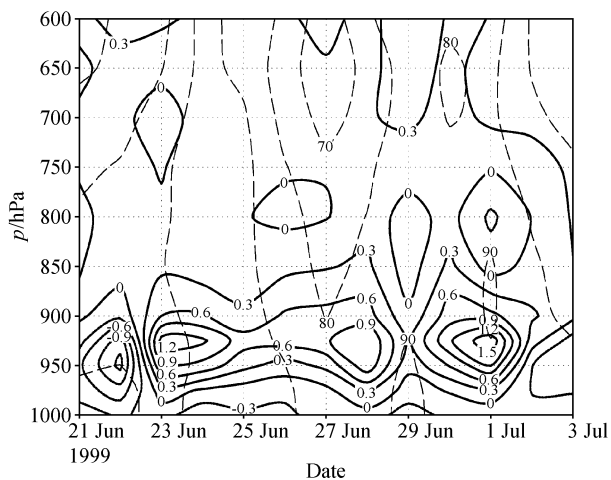


图2 广义湿位涡(单位: PVU)(实线)和相对湿度(虚线)区域平均的气压-时间变化

Fig. 2 The pressure-time variation of region-averaged generalized moist potential vorticity (GMPV) (solid lines, units: PVU) and relative humidity (dashed lines)

中, 广义湿位涡异常中心从广西延伸到江苏, 尤其在暴雨中心超过100 mm 的江西北部 and 安徽西南

部, 对应了两个广义湿位涡的异常大值中心, 广义湿位涡达到 3.5 PVU, 而整个降水量超过 50 mm 的暴雨区基本都有大于 2.0 PVU 的广义湿位涡正异常与之对应。所以, 6月23日24小时降水与广义湿位涡异常区域的对应是相当好的。从27日的情况来看, 广义湿位涡的异常区域的东部已经转为纬向型(图3b), 而西部还维持西南-东北走向, 与同一天的暴雨区分布也基本对应(图1b), 表明广义湿位涡的变化与雨带变化的趋势基本一致, 能基本反映出暴雨落区的转向。从6月28日的暴雨落区与广义湿位涡分布来看, 暴雨区的西部已经较前一天偏东西走向, 整个雨区基本转为准东西走向(图3c), 而广义湿位涡的异常区域也有同样的特征, 只是异常区比暴雨区偏南。到了6月30日(图3d), 长江中下游的暴雨中心仍然维持, 广义湿位涡异常区域与长江下游的暴雨中心对应也是较好的。

同时, 从图1b和图3b、图1c和图3c以及图1d和图3d上, 都可以发现长江流域一带的广义湿

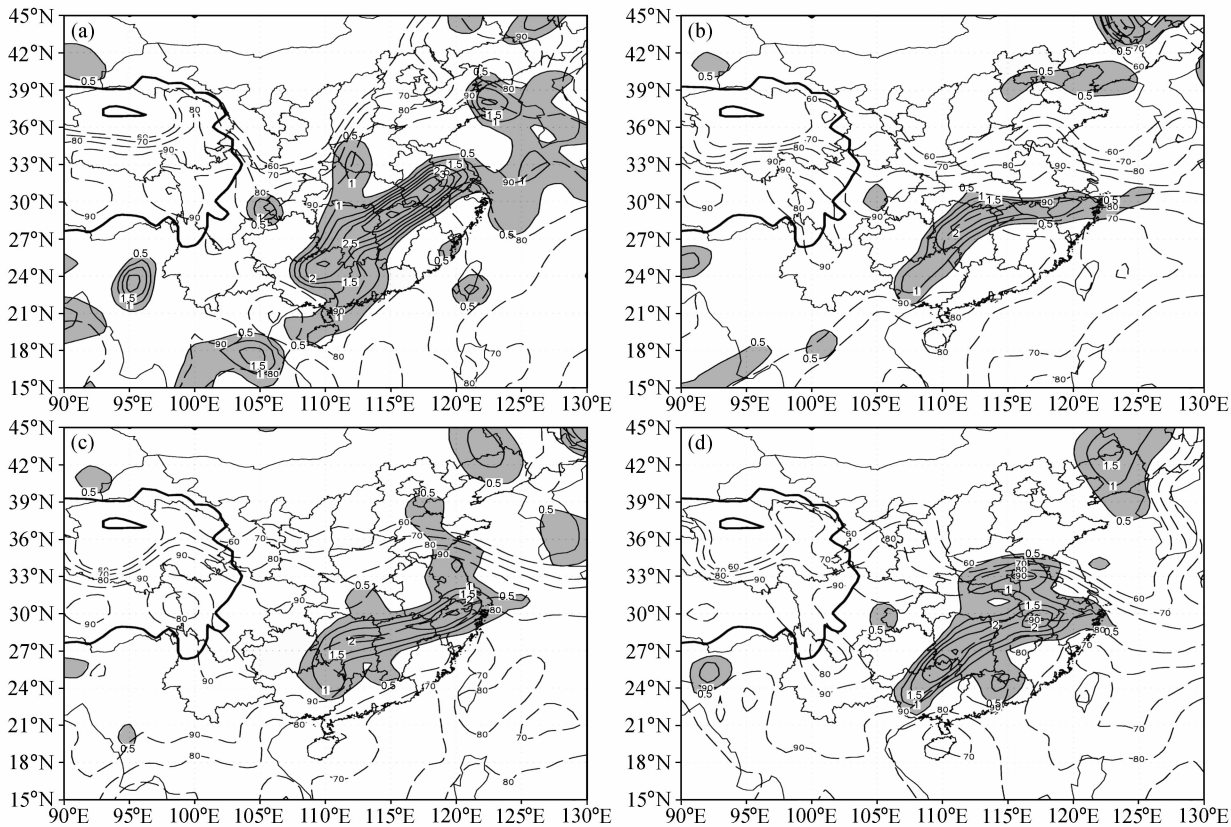


图 3 1999 年 6 月 925 hPa 广义湿位涡(实线, 等值线间隔: 0.5 PVU)和相对湿度(虚线, 等值线间隔: 10%)分布: (a) 23 日 00 时; (b) 27 日 00 时; (c) 28 日 00 时; (d) 30 日 00 时。阴影: 广义湿位涡 ≥ 0.5 PVU 的区域

Fig. 3 Horizontal distributions of GMPV at 925 hPa (solid isolines with 0.5 PVU interval, the shading represents $\text{GMPV} \geq 0.5$ PVU) and relative humidity (dashed isolines with 10% interval) at 0000 UTC on (a) 23 Jun, (b) 27 Jun, (c) 28 Jun, (d) 30 Jun 1999

位涡大值区略偏于 24 小时累积降水大值区的南侧, 这可能与水汽主要是从南边往北输送有关, 水汽的最大辐合带不在梅雨锋上, 而是在其南侧^[21, 27], 而且本文所考虑的是假绝热过程, 而实际上大气并不严格是这样, 因此降水量与水汽的凝结量之间并不等价, 也可能会有有一定的偏差。另外, 广义湿位涡的异常中心有时并没有降水发生, 如 6 月 30 日, 广义湿位涡西端异常区与贵州、广西出现的 20 mm 以上的雨带对应位置偏东, 同时在辽宁、吉林、内蒙古东部交界出现的异常中心并没有降水对应, 在河南、安徽交界处也有虚假的异常中心, 说明广义湿位涡的异常虽然基本与大范围的暴雨区对应得还不错, 但在小范围内会出现虚假的异常。这表明广义湿位涡虽然集中体现了大气动力、热力和水汽集中机制, 但仍然不能全面反映所有暴雨落区。这进一步说明了暴雨发生的复杂性, 需要我们考虑更多的因素, 做更多的工作。

4 小结和讨论

通过引入非均匀饱和广义位温得到广义湿位涡方程, 并从理论上指出暴雨发生时有利于非均匀饱和和大气中广义湿位涡异常的出现。对 1999 年 6 月下旬长江流域梅雨期发生的暴雨和广义湿位涡异常的诊断表明: 广义湿位涡正异常的高度主要集中在 925~950 hPa 之间, 与实际大气中水汽集中在低层是一致的, 与周玉淑等^[28]用广义湿位涡做暴雨分析和预测所得结论也是一致的。本文的意义在于, 从理论和资料诊断两个方面一致性地证实了在强暴雨系统中广义湿位涡异常的确存在。这种异常的广义湿位涡主要出现在实际大气的临近饱和区, 与大范围的雨带分布和走向基本一致, 可作为暴雨落区和走向的示踪物。但是, 与实际暴雨区相比, 广义湿位涡异常区域有时会出现虚假的异常中心。此外, 由于 900 hPa 以下的广义湿位涡异常区域反映

了暴雨过程中暴雨落区附近水汽梯度较大的特点,但暴雨是在更高的层次上发生的,因此,暴雨落区的诊断不仅只用广义湿位涡异常,还应利用由暴雨造成的质量强迫下的湿位涡异常来共同判断暴雨的落区^[25],如单一使用广义湿位涡异常判断暴雨落区可能会出现虚假现象。因此,我们下一步将考虑用广义湿位涡分析方法与其他一些新的动力变量分析方法相结合^[29~33],以期能改进对暴雨落区、走向及暴雨系统移动预测的准确度,实现理论与实际业务的紧密结合。

参考文献 (References)

- [1] 陶诗言,等. 中国之暴雨. 北京: 科学出版社, 1979. 225 pp
Tao Shiyang, et al. *The Torrential Rain in China* (in Chinese). Beijing: Science Press, 1979. 225 pp.
- [2] 谢义炳. 湿斜压大气的天气动力学问题. 暴雨文集. 长春: 吉林人民出版社, 1978. 1~15
Xie Y B. Synoptic problems in moist baroclinic atmosphere. *Thesis Collection on Torrential Rain* (in Chinese). Changchun: Jilin People's Publishing House, 1978. 1~15
- [3] 王两铭, 罗会邦. 饱和湿空气动力学的基本方程和主要特征. 气象学报, 1980, **38** (1): 44~50
Wang L M, Luo H B. The basic equations and main characteristics of saturated moist dynamics. *Acta Meteor. Sinica* (in Chinese), 1980, **38** (1): 44~50
- [4] 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): 387~405
Wu Guoxiong, Cai Yaping, Tang Xiaojing. Moist potential vorticity and up-slide vorticity development. *Acta Meteor. Sinica* (in Chinese), 1995, **53** (4): 387~405
- [5] 王兴荣, 石春娥, 汪钟兴. 非静力平衡条件下的垂直坐标变换及湿空气动力学方程组. 大气科学, 1997, **21** (5): 557~563
Wang X R, Shi C E, Wang Z X. Non-hydrostatic vertical co-ordination transition and moist dynamic equations. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (*Scientia Atmospherica Sinica*) (in Chinese), 1997, **21** (5): 557~563
- [6] Tripoli G J, Cotton W R. The use of ice-liquid water potential temperature as a thermodynamic variable in deep atmospheric models. *Mon. Wea. Rev.*, 1981, **109**: 1094~1102
- [7] Pointin Y. Wet equivalent potential temperature and enthalpy as prognostic variables in cloud modeling. *J. Atmos. Sci.*, 1984, **41**: 651~660
- [8] Hauf T, Holler H. Entropy and potential temperature. *J. Atmos. Sci.*, 1987, **44**: 2887~2901
- [9] Ooyama K V. A thermodynamic foundation for modeling the moist atmosphere. *J. Atmos. Sci.*, 1990, **47**: 2580~2593
- [10] Ooyama K V. A dynamic and thermodynamic foundation for modeling the moist atmosphere with parameterized microphysics. *J. Atmos. Sci.*, 2000, **58**: 2073~2102
- [11] Soriano L J, Garcia Diez E L. Effect of ice on the generation of a generalized potential vorticity. *J. Atmos. Sci.*, 1997, **54**: 1385~1387
- [12] Schubert W H, Hausman S A, Garcia M, et al. Potential vorticity in a moist atmosphere. *J. Atmos. Sci.*, 2001, **58**: 3148~3157
- [13] Bannon P R. Theoretical foundations for models of moist convection. *J. Atmos. Sci.*, 2002, **59**: 1967~1982
- [14] Betts A K. Non-precipitating cumulus convection and its parameterization. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 1973, **99**: 178~196
- [15] Persson O. Simulations of the potential vorticity structure and budget of FRONTS 87 IOP8. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 1995, **121**: 1041~1081
- [16] Gao S, Wang X, Zhou Y. Generation of generalized moist potential vorticity in a frictionless and moist adiabatic flow. *Geophys. Res. Lett.*, 2004, **31**: L12113, doi: 10.1029/2003GL019152
- [17] Gao Shouting, Zhou Yushu, Lei Ting, et al. Analyses of hot and humid weather in Beijing city in summer and its dynamical identification. *Science in China* (D), 2005, **48** (Supp. II): 128~137
- [18] Yang Shuai, Gao Shouting. Modified Richardson number in non-uniform saturated moist flow. *Chinese Physics Letter*, 2006, **23**: 3003~3006
- [19] 黄美元, 徐华英. 云和降水物理. 北京: 科学出版社, 1999. 1~56
Huang M Y, Xu H Y. *Cloud and Precipitation Physics* (in Chinese). Beijing: Science Press, 1999. 1~56
- [20] Zhou Yushu, Deng Guo, Cheng Huailiang, et al. Synoptic features of the second Meiyu period in 1998 over China. *Acta Meteorologica Sinica*, 2005, **19** (1): 31~43
- [21] 周玉淑, 高守亭, 邓国. 江淮流域 2003 年强梅雨期的水汽输送特征分析. 大气科学, 2005, **29** (2): 195~204
Zhou Yushu, Gao Shouting, Deng Guo. A diagnostic study of water vapor transport and budget during heavy precipitation over the Changjiang River and the Huaihe River basins in 2003. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2005, **29**: 195~204
- [22] 邓国, 周玉淑, 于占江. 台风 Dan(9914)的水汽输送特征. 热带气象学报, 2005, **21** (5): 533~541
Deng Guo, Zhou Yushu, Yu Zhanjiang. Analysis of water vapor transportation in typhoon Dan (9914). *Journal of Tropical Meteorology* (in Chinese), 2005, **21** (5): 533~541
- [23] 邓国, 周玉淑, 李建通. 台风数值模拟中边界层方案的敏感性试验 I. 对台风结构的影响. 大气科学, 2005, **29**: 417~428

- Deng Guo, Zhou Yushu, Li Jiantong. The experiments of the boundary layer schemes on simulated typhoon. Part I. The effect on the structure of typhoon. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2005, **29**: 417~428
- [24] 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**: 662~670
Gao Shouting, Lei Ting, Zhou Yushu, et al. Diagnostic analysis of moist potential vorticity in torrential rain systems. *Journal of Applied Meteorological Sciences* (in Chinese), 2002, **13**: 662~670
- [25] 邓国, 周玉淑, 崔晓鹏. 2003 年梅雨期湿位涡异常诊断分析. *中国科学院研究生院学报*, 2005, **22**: 712~719
Deng Guo, Zhou Yushu, Cui Xiaopeng. A diagnosis of moist potential vorticity anomaly during Meiyu period in 2003. *Journal of the Graduate School of the Chinese Academy of Sciences* (in Chinese), 2005, **22**: 712~719
- [26] 周玉淑, 邓国, 雷霆. 湿位涡的保守性原理及其应用. *中国科学院研究生院学报*, 2006, **23**: 692~700
Zhou Yushu, Deng Guo, Lei Ting. Impermeability of moist potential vorticity substance and its application. *Journal of the Graduate School of the Chinese Academy of Sciences* (in Chinese), 2006, **23**: 692~700
- [27] Zhou Yushu, Deng Guo, Lei Ting, et al. The thermodynamic and dynamical features of double front structure during 21–31 July 1998 in China. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2005, **22** (6): 924~935
- [28] 周玉淑, 曹洁, 王东海. 非均匀饱和和广义湿位涡在暴雨分析与预测中的应用. *应用气象学报*, 2007, **18**: 817~822
Zhou Yushu, Cao Jie, Wang Donghai. The application of generalized moist potential vorticity in non-uniformly saturated atmosphere to analyses and forecast of torrential rain. *Quarterly Journal of Applied Meteorology* (in Chinese), 2007, **18**: 817~822
- [29] Gao S T, Ping F, Li X. A convective vorticity vector associated with tropical convection: A two-dimensional cloud-resolving modeling study. *J. Geophys. Res.*, 2004, **109**: D14106, doi: 10.1029/2004JD004807
- [30] Gao S T, Li X, Tao W-K, et al. Convective and moist vorticity vectors associated with tropical convection: A three-dimensional cloud-resolving model simulation. *J. Geophys. Res.*, 2007, **112**: D01105, doi: 10.1029/2006JD007179
- [31] Gao S, Cui X, Zhou Y, et al. A modeling study of moist and dynamic vorticity vectors associated with two-dimensional tropical convection. *J. Geophys. Res.*, 2005, **110**, D17104, doi: 10.1029/2004JD005675
- [32] Gao S, Zhou Y, Li X. Effects of diurnal variations on tropical equilibrium states: A two-dimensional cloud-resolving modeling study. *J. Atmos. Sci.*, 2007, **64** (2): 656~664
- [33] Yang S, Gao S, Wang D. Diagnostic analysis of the ageostrophic $\mathbf{Q}$ vector in the non-uniformly saturated, frictionless and moist adiabatic flow. *J. Geophys. Res.*, 2007, **112**, D09114, doi: 10.1029/2006JD008142