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.

广义湿位涡在江淮流域暴雨分析和预报中的应用

周玉淑

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

摘 要利用中尺度数值模式 MM5,以6h间隔的 NCEP/NCAR 1°×1°的格点资料为背景,加入新一代天气雷达(CINRAD-SA 雷达)1h间隔的反演风廓线资料和12h探空、3h常规地面观测进行四维同化模拟得到的输出资料,检验非均匀饱和大气中的广义湿位涡在2003年江淮流域暴雨动力指示方面的分析和预报能力。理论分析表明:广义湿位涡综合体现了大气的动力、热力及水汽作用,相对于常用的温度、湿度等物理量来说,在一定程度上包含了风场、温度场和湿度场的相互作用,对实际非均匀饱和大气的热力变化和水汽影响有较好的反映。对模拟结果的诊断发现,广义湿位涡倾向值的正负及强弱变化对暴雨落区预报和单站降水变化趋势预报都有一定的指示意义。利用 NCEP/NCAR 1°×1°格点资料和气象台站观测的实况降水资料,对 1999年长江流域梅雨和 2007年淮河流域大洪水时期的广义湿位涡及其倾向变化与区域平均降水变化的对比分析进一步表明了在持续性暴雨发生时期,在大气中低层(主要在500hPa以下),确实持续存在广义湿位涡和广义湿位涡倾向的异常,这种异常能在一定程度上反映出对应时期的水汽分布和水汽集中特征,与降水量的变化是一致的,而 850hPa以下的广义湿位涡倾向在一定程度上也能反映出降水的增强或减弱趋势,即:广义湿位涡倾向为正(负)异常时,未来降水量可能增加(减小),因此,广义湿位涡倾向可以定性地给出暴雨是加强还是减弱的强度趋势预报。类似于涡度、湿位涡等其他动力变量,广义湿位涡除了可作为一个分析暴雨系统发生发展的动力变量外,还可体现出暴雨时期高水汽集中的特点,在暴雨分析中有一定的优势。

关键词 广义湿位涡 暴雨分析和预报

文章编号 1006 - 9895 (2009) 05 - 1101 - 10 **中图分类号** P426 **文献标识码** A

Application of Generalized Moist Potential Vorticity to Analysis and Forecast of the Torrential Rain over the Changjiang-Huaihe River Basin

ZHOU Yushu

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

Abstract The generalized moist potential vorticity (GMPV), adopted by Gao et al. (2004b), is studied in this paper. It is found that GMPV, which contains information of interactions among wind, temperature and moisture, can be used in dynamic identification of heavy rain systems. Utilizing the retrieved horizontal wind from the observation data of China new generation weather radar (CINRAD-SA radar) with 1h interval, the sounding with 12 h interval and the surface observational data with 3 h interval, and the National Center for Environmental Prediction/National

收稿日期 2008-07-21, 2008-10-20 收修定稿

资助项目 国家重点基础研究发展计划项目(2009CB421505),中国科学院知识创新方向项目 KZCX2-YW-206-4,公益性行业(气象)科 研专项经费 GYHY200706020,灾害天气国家重点实验室开放课题 2006LASW05

作者简介 周玉淑,女,1971年出生,博士,研究方向:中尺度动力诊断分析和数值模拟。E-mail: zys@mail. iap. ac. cn

Center for Atmospheric Research (NCEP/NCAR) $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ grid data, with the four-dimensional data assimilation system, the output data of the meso-scale model MM5 with fine resolution are used to test the ability of GMPV and its tendency anomalies in dynamic identification and prediction of the torrential rain occurring over the Changjiang-Huaihe River Basin during 8 - 9 July 2003. Two sets of diagnoses are performed. One is the precipitation evolution at one single station, and the other is the locations and movements of surface heavy rain centers. Both show good correspondences between precipitation and change of GMPV and its tendency. The analyses of GMPV over the Yangtze River basin in the Meiyu period of 1999 and over the Huaihe River basin during the torrential rain period of 2007 indicate that the change of the GMPV anomaly is in agreement with that of precipitation, and the anomaly generally occurrs at mid-lower levels (under 500 hPa), which is similar to the distribution of moisture in the air. The tendency of GMPV under 850 hPa is the same as that of precipitation intensity, namely, the positive (negative) tendency of GMPV always indicates that the precipitation would increase (decrease), which is useful for the intensity forecast of torrential rain. The GMPV and its tendency not only can be taken as dynamical variables to analyze and forecast the location and intensity tendency of torrential rain, but also can reflect the distribution and concentration of water vapor, which are useful for the analysis of heavy rain cases.

Key words generalized moist potential vorticity, torrential rain analysis and forecast

1 引言

暴雨是一种发生在大尺度背景场下的中尺度现 象,一次暴雨天气过程中的降水总量并不是由一次 连续降水所组成,而是由于在此过程期间中尺度雨 团不断生成和移动的结果(朱乾根等, 1992)。关 于暴雨的发生机理以及预报理论和方法的研究一直 是我国大气科学领域的重要研究课题之一(陶诗言 等,1979,1980;丁一汇,1998;高守亭等,2003)。 在暴雨预报过程中,既要研究暴雨发生时期的大尺 度环流系统,更要着眼于直接造成暴雨的中尺度对 流系统。在研究这些对流系统时,由于常规气象资 料时空分辨率的限制,暴雨预报的准确率一直不 高。目前,由于中国气象局新一代天气雷达的布网 和业务使用, 高时空分辨率的中尺度数值模式(如 MM5、ARPS等)在暴雨模拟预报方面的广泛应用 (张庆红等,2000;高坤等,2001;程麟生等,2001; 王建捷等,2002;邓国等,2005),以及雷达资料在 中尺度数值模式中的同化应用,都使得对暴雨天气 系统发生发展过程的成功模拟成为可能 (Sheng et al., 2006; 李柏等, 2007)。

通过对近年来不同模式模拟结果的分析和检验,我们越来越意识到,由于模式分辨率提高造成的暴雨空报率也大大增加,因此,仅仅依靠数值模式做暴雨预报还存在明显不足。相应的,如何对模式预报的暴雨区进行识别,以判断真实的暴雨区,目前已经成为研究中尺度系统模拟结果分析的任务

之一。从动力上讲,目前的中尺度数值预报模式的 控制方程不是针对干大气,就是针对完全饱和的饱 和湿大气的方程组。即使在模式中加入了云微物理 过程的参数化,效果也不尽如人意;从业务应用上 看,目前还没有一套我国自主研发的中尺度数值模 式完全投入业务预报,而国外开发的各种模式中的 细节性部分在我国这一天气复杂的季风区的普适性 也一直是个问题。于是,近年来有学者在总结以往 数值预报的基础上,提出了一些行之有效的针对强 对流系统的动力分析变量(高守亭等,2002;Gao et al., 2004a, 2004b, 2005a, 2005b, 2007a, 2007b)。本文就是在引入 Gao et al. (2004b) 提出 的非均匀饱和大气广义湿位涡概念基础上, 探讨非 均匀饱和大气广义湿位涡异常及它的倾向方程用于 预报暴雨落区和移动的可行性,并用包含了中国新 一代天气雷达(CINRAD-SA)资料信息的高分辨 率 MM5 模式输出资料进行验证。同时,也用 NCEP/NCAR 的格点分析资料对 1999 年和 2007 年长江流域和淮河流域强降水期的广义湿位涡及其 倾向的计算结果与实况观测降水作进一步的对比分 析。

2 广义湿位涡概念和方程

在实际大气中,整个大气没有达到完全饱和而 只是在干湿共存的非均匀饱和的状态下,对于这样 的既不是完全干燥又不是完全饱和的实际湿大气, 位温和相当位温等概念的适用性都受到了一定的限 制。因此, Gao et al. (2004b) 对相对湿度很大、有凝结现象出现但大部分地区并未达到饱和的区域, 在相当位温的表达式中引入一个凝结几率函数 (q/q_s)^k之后,更适合于描述实际湿大气的热力特 征。在本节中,着重对广义位温以及广义湿位涡异 常与暴雨发生发展的相关关系进行简单讨论。

引入凝结几率函数后,广义位温θ*定义为

$$heta^* = heta ext{exp} \Big[rac{L}{c_p} rac{q_s}{T} \Big(rac{q}{q_s} \Big)^k \Big],$$

结合绝对涡度方程,便可得到广义湿位涡倾向方程 为

$$\frac{\mathrm{d}P_{\mathrm{m}}}{\mathrm{d}t} = \alpha (\nabla p \times \nabla \alpha) \cdot \nabla \theta^* + \alpha \zeta_{\mathrm{a}} \cdot \nabla \left(\frac{\theta^*}{c_p T} Q_{\mathrm{d}}\right),$$

式中, $P_{\rm m} = \alpha \zeta_{\rm a} \cdot \nabla \theta^*$ 是非均匀饱和大气的广义湿 位涡。关于广义位温和广义湿位涡的具体讨论, 可 参见 Gao et al. (2004b)。

在有暴雨发生时,由于大量水汽的积聚,暴雨 区附近的相对湿度会明显增加,广义湿位涡的生成 将随水汽梯度的增加而增加,这是广义湿位涡对暴 雨湿度环境场的反映。综合上面的分析可知,高湿 环境以及一定的湿度场与水汽场配置及动力形势有 利于广义湿位涡发生异常,所以可以用广义湿位涡 作为分析暴雨天气发生的一个动力变量。

3 暴雨个例诊断分析

根据上一节理论分析,暴雨天气发生时的动力 热力和水汽场配置有利于广义湿位涡异常的发生, 实际情况是否如此,需要依据观测资料进行动力诊 断。2003年江淮流域发生了严重的洪涝灾害,6月 下旬到7月上旬的大暴雨过程中,梅雨锋持续稳定 在江淮流域,梅雨锋上的中尺度对流系统 (MCS) 和低涡活动频繁,是造成暴雨洪涝的直接因子,也 为我们验证广义湿位涡对暴雨分析和预报的有效性 提供了典型个例。本文分析所用资料来自于 MM5 中尺度数值模式的模拟,模拟中用到的资料包括 NCEP/NCAR 1°×1°的格点分析资料,一天四个时 次,分别为00时、06时、12时和18时(国际协调 时,下同),常规探空(00时、12时)和地面观测资 料(3h间隔,一天8个时次),以及长沙、常德、合 肥、南昌、南京、武汉、宜昌7个站的雷达观测资 料。首先,对多普勒雷达观测得到的径向风进行水 平风场的反演,得到逐时的雷达站点处的风廓线资

料,然后,使用 NCEP 1°×1°的格点分析资料作为 MM5 模式的背景场,提供模式的初边值条件,再 用雷达反演风场和地面常规观测资料进行客观分析 订正,在全物理过程的模拟中,则采用牛顿张弛逼 近法的四维资料同化方案来同化分析雷达反演风廓 线及常规探空和地面观测资料。模拟初始时刻为 2003年7月8日12时, 共积分24h, 具体方案参 阅李柏等(2007)的模拟方案说明和周玉淑等 (2007)的应用。模拟结果与实况的对比分析表明, 模式对本次暴雨过程的模拟是成功的,模拟结果可 以用于暴雨系统结构以及发生发展过程的分析。所 以,本文以下的诊断均采用该模拟的输出资料来进 行广义湿位涡及其倾向的计算。为了综合检验广义 湿位涡方法的预报效果,对这次暴雨过程做了两组 对比分析:一是模拟区域的预报效果检验,二是单 站预报效果检验。

图 1a 和 1b 分别是 2003 年 7 月 8 日 17 时和 18 时地面1小时降水量分布,图1c是8日15时900hPa 高度上的广义湿位涡倾向值。不难看出,广义湿位 涡的正负值中心与图 1a 和 1b 所示的地面降水中心 移动趋势相对应。具体来看,图 1a 中位于(29.5°N, 111°E)的降水中心,在1小时之后(图 1b)加强, 且雨区整体向东扩展;图 1c 在 (29.5°N, 112°E) 处的正值中心以及围绕它的负值区很好地表征了这 一变化趋势。位于图 1a 中以(33.5°N, 118.5°E) 和 (32.5°N, 118°E) 为中心的雨区, 在1小时内偏 北的中心加强,偏南的减弱,且整体向东北方向移 动,其东南侧的小降水中心(32°N,119.5°E)逐渐 合并到大雨区中;从图 1c 的该范围处的正负值配 置看均有一一对应的结果。从这个时刻来看,通过 广义湿位涡倾向值「单位: 10⁻³ PVU/s (1 PVU= 1.0×10⁻⁶ m²·s⁻¹·K·kg⁻¹,下同)]可以提前1~ 2小时作出暴雨移动预报。但单用广义湿位涡倾向 也有不足之处, 如在图 1c (25°N, 111°E) 处的广义 湿位涡倾向的大值中心,确实能预测对应地区降水 量的增加,然而与其他地方相比,增加的雨量值没 有广义湿位涡倾向值显示的那么大。

再给出另外一个时刻的情况。图 2a 和 2b 显示的是 8 日 22 时和 9 日 00 时地面 1 小时降水量分布,图 2c 是 8 日 20 时 900 hPa 的广义湿位涡倾向。 从图 2c 指示的正值中心 (34.5°N, 121°E)、(30°N, 115°E)、(30°N, 117°E) 以及 (28°N, 110°E) 附近







108°E 110°E 112°E 114°E 116°E 118°E 120°E 122°E 124°E

图 2 2003 年 7 月 (a) 8 日 22 时和 (b) 9 日 00 时地面 1 小时降 水量(単位: mm)以及 (c) 8 日 20 时 900 hPa 广义湿位涡倾向 Fig. 2 Distribution of 1-hour precipitation (mm) at (a) 2200 UTC 8 Jul 2003 and (b) 0000 UTC 9 Jul 2003, and (c) horizontal distribution of generalized moist potential vorticity tendency (10⁻³ PVU/s) at 900 hPa at 2000 UTC 8 Jul 2003

区域,都能在图 2b上找到相应的雨量中心出现或中 心值加强的现象;广义湿位涡倾向的负值区(34°N, 119°E)也很好地表征了图 2a上对应地区的降水中 心在之后1小时的消失过程。这个时刻仍然出现的 问题是,在图 2c中,(37°N,121°E)附近出现的大 值中心,找不到对应的雨量增强现象,即广义湿位 涡倾向方法也有空报现象,而且广义湿位涡倾向对 暴雨强度变化的指示意义也没有8日17时和18时 那么明显,但从整体上来看,广义湿位涡倾向预报 的结果还是令人鼓舞的,如果再与大尺度背景场分 析和模拟结果相结合,对暴雨系统移动和强度变化 的指示意义会更好。

总的来说,广义湿位涡倾向值做暴雨落区预 报,具有1~3小时的提前时效,而且区域预报效 果不错,但也还存在着空报等问题,这也是我们在 最后的讨论中主张发展多个动力因子的集合预报方 法的出发点,目地是利用多个动力变量的集合来对 模式预报的暴雨区进行综合判别。

下面检验单站降水预报的准确性。图 3a 是从 7月8日12时到9日02时(29°N, 111°E)的地面 1小时降水量时间演变,可见,该站点(常德)的逐 时雨量变化先是减少,到8日15时开始增加,从 20 时以后急速减少,到23 时接近为零,之后又出 现了一次弱降水。从对应时刻的广义湿位涡(图 3b) 的时间演变上可以看到这样的变化。具体来说 就是广义湿位涡出现正异常时,对应的是降水量增 加;出现负异常,则降水减弱。这样的正负交替, 正是对上一节理论分析得到的广义湿位涡能对暴雨 有动力识别作用的极好验证。为了检验广义湿位涡 倾向对单站降水的预报意义,图 3c 给出了同一站 点上空广义湿位涡倾向值的时间变化。8日13时 900 hPa 附近出现广义湿位涡倾向的负中心,则未 来时刻广义湿位涡将减小,对应着图 3a 中 13~15 时雨量的减弱:16时以后,广义湿位涡倾向出现深 厚的正值中心,预示着未来时刻广义湿位涡将出现 大的正异常,大约1~2小时之后该站的降水量确 实也急剧增大; 20 时开始, 常德站上空 850 hPa 附 近出现大的负值中心,预示着广义湿位涡将要减 小,大约1~2小时后降水量也出现了骤减(图 3a)。图 4a~c 是 7 月 8 日 12~19 时地面降水中心 (32.5°N, 117.5°E)的逐时地面降水量、高空广义 湿位涡及其倾向值的时间变化。从图 4a~c 来看,



图 3 2003 年 7 月 8 日 12 时~9 日 02 时 (29°N, 111°E) 地面降水 量的时间演变 (a)、广义湿位涡 (b, 单位: PVU) 和广义湿位涡倾 向 (c) 的气压-时间变化剖面

Fig. 3 (a) Temporal variation of surface precipitation, time – height cross sections of (b) generalized moist potential vorticity (PVU) and (c) its tendency (10⁻³ PVU/s) at (29°N, 111°E) from 1200 UTC 8 Jul to 0200 UTC 9 Jul 2003

无论是8日14时出现的雨量减少,16时出现的雨 量高峰,还是之后的雨量骤停,都能在广义湿位涡



图 4 2003 年 7 月 8 日 12 时到 19 时 (32.5°N, 117.5°E) 地面降水 量的时间演变 (a)、广义湿位涡 (b,单位: PVU) 和广义湿位涡倾 向 (c) 的气压-时间变化剖面

Fig. 4 (a) Temporal variation of surface precipitation, time – height cross sections of (b) generalized moist potential vorticity (PVU) and (c) its tendency (10^{-3} PVU/s) at $(32.5^{\circ}\text{N}, 117.5^{\circ}\text{E})$ from 1200 UTC to 1900 UTC 8 Jul 2003

上找到对应的倾向变化,而且广义湿位涡倾向能提前1~2小时给出指示。这表明广义湿位涡的异常

变化确实能指示出降雨量的趋势。以上都是对广义 湿位涡在暴雨动力识别方面的很好验证,表明广义 湿位涡倾向有指示暴雨系统移动和强度变化的能力。

以上是用 MM5 模拟资料对 2003 年淮河流域 的一次暴雨过程中广义湿位涡及其倾向异常与暴雨 落区和强度变化的分析,下面再来看长江流域和淮 河流域发生持续性洪水的 1999 年和 2007 年的情 况。这两年的分析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°×1°格点分析资料。1999 年长 江流域的强梅雨期从6月22日持续到7月2日, 2007 年淮河流域从 6 月 29 日进入多雨期,降水强 度大,持续时间长,本文选取了6月29日到7月 11日的强降水时段进行分析。对这两次强梅雨期 降水分布及环流分析的内容已经很多(高坤等, 2001; Zhou et al., 2004; 陶诗言等, 2008), 本文不 再给出具体的降水分布和环流形势, 而是直接分析 区域平均的降水与对应时期广义湿位涡及其倾向的 变化。

从1999年强梅雨期间长江流域附近区域平均 (25°N~30°N,110°E~120°E)24小时降水的变化 (图 5a)可见,在长江流域强梅雨期间都有降水维持,区域平均降水量一般都在4mm以上,最大超 过了15mm,且区域平均的降水量有日变化波动特 征,在7月1日达到极值后,于7月2日减小并结 束强的降水。

从对应时期区域平均的广义湿位涡在整个强梅 雨期间的气压-时间的剖面变化(图 5b)可见,在 强梅雨时段内的广义湿位涡正的异常大值区主要出 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,虽然在 6 月 26 日和 7 月 1 日降水量峰值在广义湿位涡场上则没有出现明 显的异常增强或异常区在垂直方向上的延伸,但是 可以看到,1999 年的强梅雨时期广义湿位涡异常 的高度都较低,主要出现在 850 hPa 以下,而且都 是相对湿度高于 80%的区域。而且,这一时期的广 义湿位涡主要体现为正异常(最大异常中心达到 1.5 PVU),这意味着湿大气在比湿梯度方向上的 斜压性是一直维持着的。



图 5 1999 年梅雨期区域平均(25°N~30°N,110°E~120°E)的 24 小时降水量的时间变化(a)、广义湿位涡(实线和短虚线,单 位:PVU)和相对湿度(长虚线,%)(b,)和广义湿位涡倾向(c, 单位:10⁻⁶PVU/s)的气压-时间剖面

Fig. 5 (a) Temporal variation of regional average $(25^{\circ}N - 30^{\circ}N, 110^{\circ}E - 120^{\circ}E)$ 24-h precipitation, time – height cross sections of (b) regional average generalized moist potential vorticity (solid and short-dashed lines, units: PVU) and relative humidity (long-dashed line, %) and (c) its tendency $(10^{-6}PVU/s)$ over the Yangtze River basin during the Meiyu period of 1999

从同一时期区域平均的广义湿位涡倾向变化 (图 5c) 可见, 在 1999 年的强降水期, 整个区域平 均的广义湿位涡倾向也是出现了明显的正负值的变 化,在6月22日到23日期间,低层850hPa以下 为正的广义湿位涡倾向,正的广义湿位涡中心出现 在22日,预示着未来这一区域的降水可能会增加, 与23日的区域平均增大的降水趋势是一致的。23 日到24日,区域平均的广义湿位涡倾向出现了负 异常,预测未来区域平均的降水可能减小,这与24 日区域平均的降水量的减小趋势也是一致的。25 日到26日, 广义湿位涡都为正倾向, 与该时段内 降水量增加的趋势也是一致的。但是从 26 日到 27 日期间的广义湿位涡虽然为正倾向,但降水量确是 减小的,表明只用广义湿位涡做暴雨强度预报也会 出现空报现象。从27日到29日,广义湿位涡的正 倾向减小并逐渐变为负倾向,对应 28 日到 30 日的 降水量也是减小的, 广义湿位涡倾向变化的趋势与 后期降水强度的减小趋势是一致的。到了6月30 日,低层 950~900 hPa 又出现了一个广义湿位涡 倾向的正中心,到了7月1日,则出现了一个区域 平均的降水极值,7月1日以后持续出现的广义湿 位涡倾向负异常,与之后区域平均降水的持续减小 趋势继续保持一致。从1999年长江流域强降水期 的降水与广义湿位涡及其倾向的异常变化分析可 见, 广义湿位涡异常在整个降水期是一致维持的, 虽然广义湿位涡倾向与后一日的降水强度变化趋势 有时会有相反的情形出现,但大部分时间里,正 (负)的广义湿位涡倾向往往对应之后降水强度增 加(减小),这个大的趋势是维持的,表明广义湿位 涡的异常变化确实能指示出降雨量的趋势,与用 MM5 模式输出结果对 2003 年江淮流域暴雨过程 的诊断结论也是一致的。

从 2007 年淮河流域大洪水时期的区域平均 (31°N~34°N, 110°E~120°E) 的 24 小时降水量的 时间变化 (图 6a) 可见, 2007 年淮河流域区域平均 的降水量基本都在 10 mm 以上,明显大于 1999 年 长江流域梅雨期,流域的降水量在持续维持的同时 也有日变化特征,在7月2日、5日和9日分别有3 个降水峰值,尤其9日的区域平均降水量甚至超过 了 50 mm,除了说明降雨量确实很大以外,也表明 这一天的降水非常集中,主要都集中在计算选定的 区域中。



图 6 同图 5, 但为 2007 年淮河流域大洪水时期区域平均 (31°N~ 34°N, 110°E~120°E)

Fig. 6 Same as Fig. 5, except for the regional average $(31^{\circ}N - 34^{\circ}N, 110^{\circ}E - 120^{\circ}E)$ over the Huaihe River basin during the torrential rain period of 2007

从区域平均的广义湿位涡的气压-时间剖面 (图 6b)可见,2007年淮河流域降水期间的广义湿 位涡异常虽然还是主要集中在大气的中低层,但水 汽在垂直方向的输送高度明显高于 1999 年的长江 流域,所以广义湿位涡的异常高度也相应地向上扩 展到 650 hPa 左右,尤其是在 7 月下旬末。而且, 在出现降水峰值的 7 月 2 日、5 日、9 日,广义湿位 涡的异常值也都出现了明显的向高处的伸展,尤其 是在最大降水峰值的 7 月 9 日,广义湿位涡的异常 大值中心甚至达到了 600 hPa,明显高于其他时次, 与区域平均降水量的变化趋势是一致的。而且,从 广义湿位涡出现异常的高度的相对湿度分布来看 (图 6b 中长虚线),仍然都是位于相对湿度高于 70%的区域。进一步表明,由于在广义位温表达式 中引入水汽效应后,由此得到的广义湿位涡确实也 能体现出高水汽的特征,其异常区域与高水汽区域 基本能保持一致。

从区域平均的广义湿位涡倾向的气压-时间剖 面(图 6c)可见,由于相对湿度在垂直方向延伸的 高度较高,整个广义湿位涡倾向的异常高度也是明 显比图 5c 中的异常中心偏高,但 850 hPa 以下广义 湿位涡倾向的变化与降水量的变化趋势还是有一定 的指示意义。具体来说, 6月29日开始, 850~ 950 hPa 之间就出现了广义湿位涡倾向的正值中 心,预示着未来所选区域的降水可能会增加,与图 6a 中 6 月 29~30 日降水的增大趋势是一致的。6 月30日到7月1日,广义湿位涡倾向的变化不大, 与同期降水量基本持平也是一致的。而7月1日出 现的广义湿位涡倾向的负值对2日的降水增加趋势 的预测则是错误的,2日出现的广义湿位涡正倾向 对3日降水减小的趋势预测也是相反的,但3日到 5日低层正的广义湿位涡倾向以及6日到7日低层 广义湿位涡倾向的负变化对降水量先增加后减小的 变化趋势都有所反应。7月8日到9日,从850~ 950 hPa之间出现了广义湿位涡倾向的正值中心, 与9日出现的降水量极大值中心也是对应的。9日 以后,负的广义湿位涡倾向与降水量的减小趋势也 是继续保持一致。需要指出的是,虽然7月7日到 9日,在750hPa附近出现的广义湿位涡倾向与低 层是相反的,但从低层 850 hPa 以下的广义湿位涡 倾向的异常符号来看,仍然是正(负)的广义湿位 涡倾向往往对应之后降水强度增加(减小)。所以, 从 2007 年淮河流域暴雨的分析来看, 广义湿位涡 异常中心与同期降水量的强度变化是一致的,而广 义湿位涡倾向在低层 850 hPa 以下的变化趋势与之

后的降水量的变化趋势也基本能保持一致,从而还 可用广义湿位涡倾向做暴雨强度变化的定性预报。

以上对 2003 年淮河流域的一次暴雨过程的中 尺度数值模拟结果的分析以及对 1999 年长江流域 强梅雨期和 2007 年淮河流域强降水期的区域平均 的降水量变化和广义湿位涡及其倾向变化趋势的分 析表明,在这种流域性的大洪水期间,广义湿位涡 的异常确实能反映出对应时期的水汽分布和水汽集 中特征,与降水量的变化是一致的,而 850 hPa 以 下的广义湿位涡倾向在一定程度上也能反映出降水 的增强或减弱趋势,即:广义湿位涡倾向为正(负) 异常时,未来降水量可能增加(减小),可以定性地 给出暴雨是加强还是减弱的强度预报,如果再结合 常规的天气形势分析及其他常用的动力变量(如位 涡、涡度、散度等)的分析,可以一定程度上改进 暴雨落区和强度的预测。

4 结论

从广义湿位涡的定义及其倾向方程可见, 它综 合体现了大气的动力、热力及水汽作用,相对干常 用的温度、湿度等物理量来说,在一定程度上包含 了风场、温度场和湿度场的相互作用,对体现实际 非均匀饱和大气的热力变化和水汽影响有很好的作 用。因而,利用广义湿位涡异常识别暴雨天气理论 上具有可行性。利用在数值模拟中加入时间密集的 雷达反演风廓线资料同化得到的高时空分辨率的模 式输出结果,对广义湿位涡异常与降水系统发生发 展的时空演变做了区域和单站的对比分析,结果表 明,无论是对暴雨落区预报还是对单站降水变化趋 势预报,广义湿位涡及其倾向变化都有较好的应 用。对 1999 年长江流域强梅雨期和 2007 年淮河流 域强降水期的区域平均的降水量变化和广义湿位涡 变化趋势的分析也表明,广义湿位涡的异常能在一 定程度上反映出对应时期的水汽分布和水汽集中特 征, 与降水量的变化是一致的, 而 850 hPa 以下的 广义湿位涡倾向在一定程度上也能反映出降水的增 强或减弱趋势,即:广义湿位涡倾向为正(负)异 常时,未来降水量可能增加(减小),可以定性地给 出暴雨是加强还是减弱的强度预报,虽然还不能给 出具体的雨量预报,但能在一定程度上反映出降水 的增强或减弱趋势,能定性地给出暴雨的强度预 报。

就本文分析的个例来看,广义湿位涡对流域性 的降水以及台站降水趋势预报都有较好的指示意 义,虽然对区域预报仍有可能出现空报现象,也不 能给出暴雨的定量预报,但是在目前情况下,利用 广义湿位涡方法来分析和预报暴雨区,可多提供一 个动力变量的指示信息,对台站业务人员提高暴雨 业务预报准确率来说,还是一个简单可行的方法。 今后,我们将结合其他的一些新的动力变量及其预 报方程进行诊断,发展集合动力因子的暴雨预报方 法,从而更好地利用不同动力变量及其异常来识别 并预报暴雨落区和强度。

参考文献 (References)

- 程麟生,冯伍虎. 2001. "98.7" 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,25:465-478. Cheng Linsheng, Feng Wuhu. 2001. Analyses and numerical simulation on an abrupt heavy rainfall and structure of a mesoscale vortex during July 1998 [J]. Chinese J. Atmos. Sci. (in Chinese), 25:465-478.
- 邓国,周玉淑,李建通. 2005. 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 [J]. 大气科学, 29: 417 – 428. Deng Guo, Zhou Yushu, Li Jiantong. 2005. The experiments of the boundary layer schemes on simulated typhoon. Part I. the effect on the structure of typhoon [J]. Chinese J. Atmos. Sci. (in Chinese), 29: 417 – 428.
- 丁一汇. 1998. 陶诗言先生与中国暴雨 [M]//中国科学院大气物理 研究所. 东亚季风与中国暴雨——庆贺陶诗言先生八十华诞集. 北京: 气象出版社, 137-141. Ding Yihui. Professor Tao Shiyan and torrential rain in China (in Chinese) [M]//Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences. East Asian Monsoon and Torrential Rain in China. Beijing: China Meteorological Press, 137-141.
- 高坤, 徐亚梅. 2001. 1999 年 6 月下旬长江中下游梅雨锋低涡扰动 的结构研究 [J]. 大气科学, 25: 740 - 756. Gao Kun, Xu Yamei. 2001. A simulation study of structure of mesovortexes along Meiyu front during 22 - 30 June 1999 [J]. Chinese J. Atmos. Sci. (in Chinese), 25: 740-756.
- 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: 662 - 670. Gao Shouting, Lei Ting, Zhou Yushu, et al. 2002. Diagnostic analysis of moist potential vorticity anomaly in torrential rain systems [J]. Journal of Applied Meteorological Sciences (in Chinese), 13: 662-670.
- 高守亭,赵思雄,周晓平,等. 2003. 次天气尺度及中尺度暴雨系统 研究进展 [J]. 大气科学, 27: 618-627. Gao Shouting, Zhao Sixiong, Zhou Xiaoping, et al. 2003. Progress of research on subsynoptic scale and mesoscale torrential rain systems [J]. Chinese J. Atmos. Sci. (in Chinese), 27: 618-627.

Gao S, Pin 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.

- Gao S, Wang X, Zhou Y. 2004b. Generation of generalized moist potential vorticity in a frictionless and moist adiabatic flow [J]. Geophy. Res. Lett., 31: L12113.
- Gao S, Cui X, Zhou Y, et al. 2005a. 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, Zhou Y, Lei T, et al. 2005b. Analyses of hot and humid weather in Beijing city in summer and its dynamical identification [J]. Science in China (Ser. D), 48 (Suppl. II): 128-137.
- Gao S, Zhou Y, Li X. 2007a. Effects of diurnal variations on tropical equilibrium states: A two-dimensional cloud-resolving modeling study [J]. J. Atmos. Sci., 64 (2): 656-664.
- Gao S T, Li X F, Tao W-K, et al. 2007b. Convective and moist vorticity vectors associated with tropical oceanic convection: A three-dimensional cloud-resolving model simulation [J]. J. Geophys. Res., 112: D01105.
- 李柏,周玉淑,张沛源. 2007. 新一代天气雷达资料在 2003 年淮河 流域暴雨模拟中的初步应用:模拟降水和风场的对比 [J]. 大气 科学,31 (5):826-838. Li B, Zhou Y, Zhang P. 2007. Application of the China new generation weather radar data to the torrential rain simulation over the Jianghuai basin in 2003. Validation of precipitation and wind [J]. Chinese J. Atmos. Sci. (in Chinese), 31 (5): 826-838.
- Sheng C, Gao S, Xue M. 2006. Short-term prediction of a heavy precipitation event by assimilating Chinese CINRAD radar reflectivity data using complex cloud analysis [J]. Meteor. Atmos. Phys., 94: 167-183.
- 陶诗言,丁一汇,周晓平. 1979. 暴雨和强对流天气的研究 [J]. 大 气科学,3:227-238. Tao Shiyan, Ding Yihui, Zhou Xiaoping. 1979. The present status of the research on the rainstorm and se-

vere convective weathers in China [J]. Chinese J. Atmos. Sci. (Scientia Atmospherica Sinica) (in Chinese), 3: 227-238.

- 陶诗言,等. 1980. 中国之暴雨 [M]. 北京:科学出版社, 255pp. Tao Shiyan, et al. 1980. The Torrential Rain in China (in Chinese) [M]. Beijing: Science Press, 255pp.
- 陶诗言, 卫捷, 张小玲. 2008. 2007 年梅雨锋降水的大尺度特征分 析 [J]. 气象, 34 (4): 3-15. Tao Shiyan, Wei Jie, Zhang Xiaoling. 2008. Large-scale features of the Mei-Yu front associated with heavy rainfall in 2007 [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 34 (4): 3-15.
- 王建捷,李泽椿. 2002. 1998 年—次梅雨锋暴雨中尺度对流系统的 模拟与诊断分析 [J]. 气象学报, 60: 146-155. Wang Jianjie, Li Zechun. 2002. Numerical simulation and diagnostic analysis on mesoscale convective systems of a torrential rainfall in Meiyu period of 1998 [J]. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 60: 146-155.
- 张庆红,刘启汉,王洪庆,等. 2000. 华南梅雨锋上中尺度对流系统 的数值模拟 [J]. 科学通报,45:1988-1992. Zhang Qinghong, Liu Qihan, Wang Hongqing, et al. 2000. Numerical simulation of mesoscale convective systems over the Meiyu front in South China [J]. Chinese Science Bulletin (in Chinese),45:1988-1992.
- 朱乾根,林锦瑞,寿绍文,等. 1992. 天气学原理和方法 [M]. 北京: 气象出版社, 383 384. Zhu Qian'gen, Lin Jinrui, Shou Shaowen, et al. 1992. Synoptic Principles and Methods (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 383 384.
- 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,18:755 - 760. Zhou Yushu, Cao Jie, Wan Donghai. 2007. The application of generalized moist potential vorticity in non-uniformly saturated atmosphere to analyses and forecast of torrential rain [J]. Jounnal of Applied Meteorological Science (in Chinese), 18:755 - 760.
- Zhou Y, Gao S, Shen S S P. 2004. A diagnostic study of the structural and dynamical features of the Meiyu front system [J]. J. Meteor. Soc. Japan, 81 (6): 1565-1576.