

两次气旋暴雨过程风廓线特征分析

孙贞¹, 徐晓亮¹, 盛春岩², 李德萍¹, 王建林¹, 高荣珍¹, 李斌¹

(1.青岛市气象局, 山东 青岛 266003; 2.山东省气象科学研究所, 山东 济南 250031)

摘 要:利用对流层风廓线雷达的高时空分辨风场数据,对2008年8月17日、30~31日分别从东西两个不同路径经过青岛的气旋暴雨过程,计算了高中低不同层次风暴相对螺旋度(SRH)、最大风速及其高度等。经过分析和对比,得出中低层SRH对气旋的移近和降水的开始具有一定的预示作用。越接近气旋中心低层暖平流越强。中低层SRH在两次气旋暴雨过程作用各有不同。气旋暴雨过程中较强的雨强出现在中层SRH增大至峰值和低层SRH迅速增大的过程,也就是中层SRH向低层扩展的过程。中低层间的急流轴变窄的过程与暴雨的强度密切相关。

关键词:风廓线雷达;风暴相对螺旋度;暴雨

中图分类号:P458 **文献标识码:**A **文章编号:**1003-0239(2011)02-0028-07

1 引言

2008年8月17日,2008年8月30~31日有两次江淮气旋北上,分别从青岛东部和西部经过,给青岛全区造成了暴雨,局部大暴雨。本文利用上马对流层风廓线资料,结合上马自动气象站降雨数据,详细分析这两次经过东、西不同路径气旋的风廓线特征。

由于风廓线雷达的时间和空间分辨能力超过任何一种高空风测量系统,其探测的资料在局地暴雨、冰雹等夏季强对流天气预报中的应用越来越受到人们的重视。刘淑媛等^[1-6]等利用风廓线雷达对暴雨过程进行了详细分析。杨引明等^[5-6]着重讨论了强对流天气过程风廓线雷达资料的特征。张京英、漆梁波等用雷达风廓线产品分析一次暴雨与高低空急流的关系^[23]。黄伟、张勇等^[7-9]也利用风廓线雷达进行了应用研究。在大多数的文献中利用风廓线雷达资料多为定性分析,定量分析少,特别是对江淮气旋的分析甚少。

本文利用位于青岛上马的对流层风廓线资料计算了高、中、低不同层次的风暴相对螺旋度、

最大风速及其高度、急流强度等定量指标,试图找出两次不同江淮气旋暴雨过程风廓线特征的相同点和不同点。为了充分利用高时空的资料,同时也为了尽量减少原始资料信息的损耗,对5分钟的探测资料采用6点平滑处理,得到间隔5分钟的半小时平均资料。由于风廓线探测得到的垂直速度是探测的降水粒子与大气运动的合成,为了严谨起见本文未对此进行分析。

2 降水过程简述

2008年8月17日8时~22时受北上江淮气旋影响,青岛全区普降大到暴雨^[14]。从南到北造成超过100 mm的大暴雨带,青岛60.4 mm,上马站及周边5~8 km范围内共3个自动气象站平均降雨量为52.2 mm,上马站降雨量为49.8 mm。这次气旋是从青岛的上马站西部移过,从上马站气压曲线图中(图略)可以看出气旋中心在17日21:05时最低,表明此时气旋中心距离上马以西大约20 km,之后向山东半岛的东北方向移去。

2008年8月30日18时~31日15时同样受北上江淮气旋影响,青岛全区也是普降大到暴雨,超

过 100 mm 的大暴雨站点为点状沿海岸线分布^[10], 青岛 84.8 mm, 上马周边 3 个自动气象站平均降雨量为 57.8 mm, 上马站降雨量为 51.2 mm。这次气旋是从青岛东部海上经过, 同样从上马站气压曲线图中(图略)可以看出气旋中心在 31 日 8 时 35 分时最低, 表明此时气旋中心距离上马以东大约 200 km 海上, 之后气压逐渐上升, 云图显示气旋离开青岛附近海域向黄海东部、朝鲜半岛南部移去。两次气旋路径图见图 1。图中实线部分为气旋造成青岛暴雨时段的路径。

3 风廓线特征分析

3.1 风暴相对螺旋度(SRH)定义

螺旋度是表征流体边旋转边沿旋转方向运动的动力特性的物理量, 气象学家将螺旋度引入到

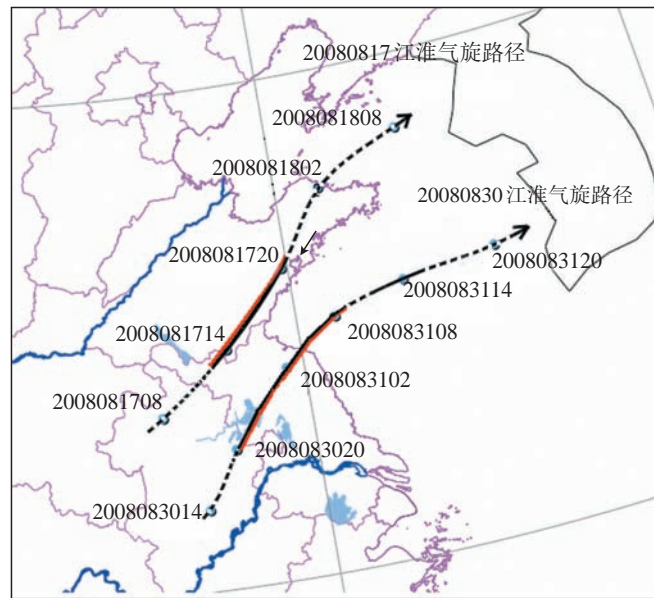
天气学领域, 定义水平方向上的螺旋度为风暴相对螺旋度(Storm Relative Helicity), 即水平相对速度和水平涡度的积:

$$SRH = \int_0^z (V - C) \cdot \omega_H dz$$

$$\text{式中: } V = (u(z), v(z)), C = (C_x, C_y), \omega_H = k \times \frac{dV_H}{dz}$$

SRH 单位: $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$, V 为环境风速, C 为风暴传播速度, ω_H 为水平涡度。

SRH 是研究风暴的重要物理量, 在风暴初期 SRH 比垂直螺旋度更具预示性, 中低层大的 SRH 的输送和变形, 有助于垂直螺旋度的形成和增长, SRH 的大值区与风暴的运动、风暴的发展增强有很好的相关性。章东华等^[11-15]先后采用螺旋度对强对流天气和暴雨进行了诊断分析, 得出其与暴雨的相关性。王丽荣应用多普勒天气雷达提供的垂



实线部分为造成青岛暴雨时的阶段, 黑箭头所指位置为上马风廓线的位置

图 1 两次江淮气旋中心移动路径图

直风廓线(VWP)计算了暴雨、冰雹、大风等个例的风暴相对螺旋度, 并指出风暴相对螺旋度在短时预报中有实际应用价值, 对预报强风暴有重要意义, 有研究把 $SRH > 150 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ 作为警戒值。

Davies-Jones 等(1990)发展了利用单站探空风资料计算风暴相对螺旋度公式^[21]:

$$SRH = \sum_{n=0}^{N=1} [(u_{n+1} - c_x)(v_n - c_y) - (u_n - c_x)(v_{n+1} - c_y)]$$

式中: u_n 、 v_n 为相应层上的风分量, c_x 、 c_y 是风暴传播速度 C 的分量, C 的取法: 取各层平均风速的 75%, 且风向右偏 40° 。

本文依据该公式利用风廓线资料计算得到高分辨的风暴相对螺旋度数据, 分析气旋暴雨过程

中风暴相对螺旋度的演变特征。

3.2 风暴相对螺旋度(SRH)的变化分析

由风暴相对螺旋度的定义可知,风暴相对螺旋度不仅表征了环境场的旋转程度,而且还表示输入到对流系统中的环境涡度的多少。同时风暴相对螺旋度为正值表明风顺高度顺转,有暖平流。风暴相对螺旋度为负值表明风顺高度逆转,有冷平流。风暴相对螺旋度即相对风暴系统的水平风速和水平涡度的积。由文献[17]可知其正值异

常增大(即二者同号,相互配合)可能是相对于风暴的水平风速增大,也可能是水平涡度增大或二者都增大,都会对应大气的异常状态。

为了清楚分析气旋影响时高、中、低空三层的SRH的变化情况,本文将0~2 km规定为低层,2~6 km为中层,6~8 km为高层,分别计算了三层SRH。图2(a、b)为8月17日、31日三层SRH序列图。图中柱状为上马站周边三个自动气象站平均降水量(下同)。

图2 a为8月17日的SRH图。从图中可以看

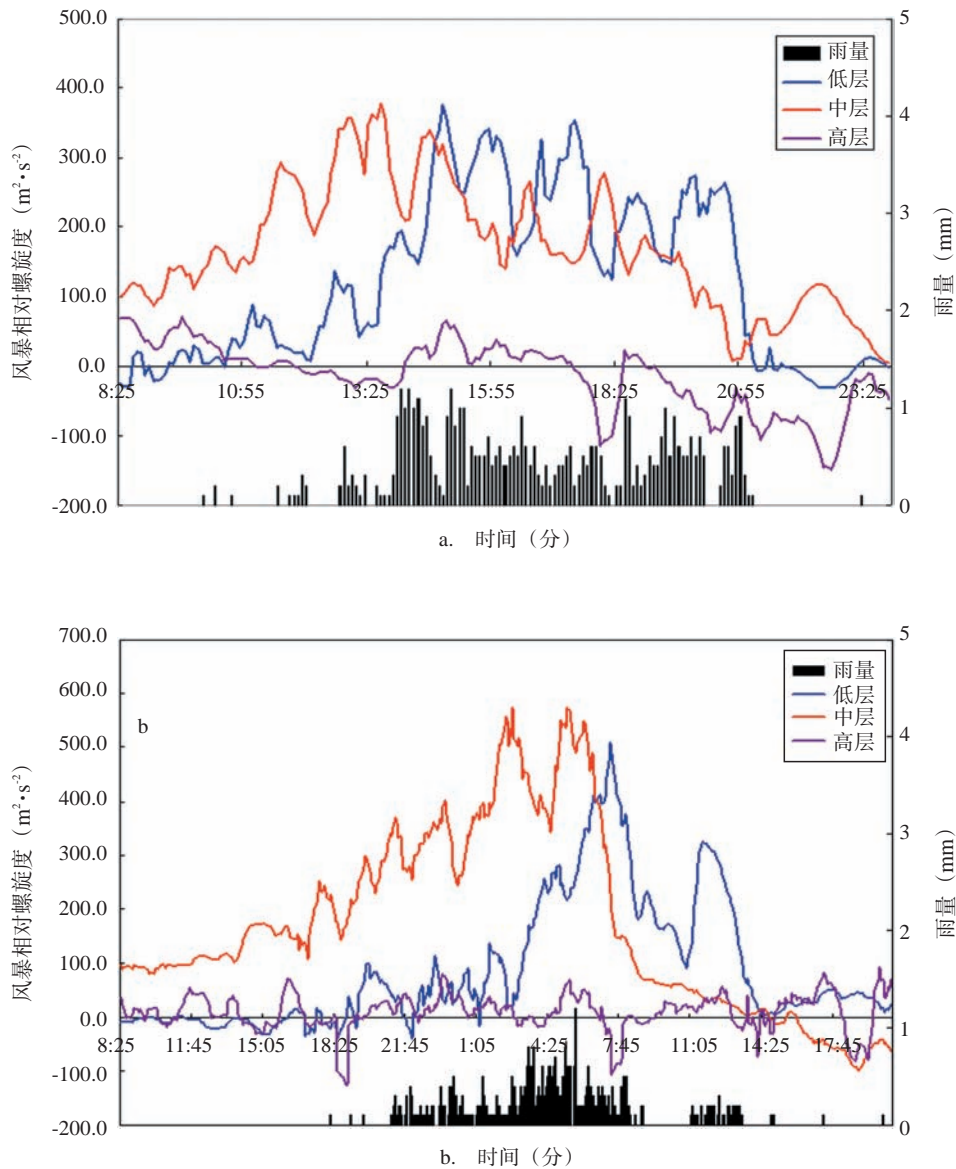


图2 2008年8月17日(a)、30~31日(b)气旋暴雨过程的风暴相对螺旋度(SRH)(图中柱状图为雨量,下同)

出,降水开始前,中层在 $100 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ 左右,高层 $70 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$,低层SRH比中高层SRH都小,在0线以下为负值。降水开始后,高层呈下降趋势,逐渐下降到0线附近振荡,降水前降为负值。而降水开始后,中低层逐渐升高,分别到达各自最高点后逐渐下降。中层SRH于13:05时达到最高 $355.7 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ 。之后呈波状逐渐下降。低层SRH于14:55时达到最高 $376.2 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$,并超过中层。之后与中层SRH呈交替逐渐下降。20:50时中层SRH已到0线附近,达到本次降水的最小值。低层从20:35分开始迅速下降,降水结束后降到负值。

图2b为8月30日08:25时~31日21:05时的SRH图。从图中可以看出,30日下午降水开始前,中层在 $100 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ 左右,这与17日过程相似。高层、低层在0线附近。降水开始后中低层始终逐渐上升。中层在31日2:45时达到本次降水的最高值 $571.5 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$,5:25时达到本次降水的次高值 $570 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$,之后迅速下降一直到降水结束。低层SRH于7:20时达到最高 $507.3 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$,超过中层,之后逐渐下降。在31日11:00~13:30时第二次降水期间低层再次上升,并且远远超过中层和高层,达到 $310 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ 。降水结束后,中层SRH降为三层中最小,低于0线以下。

比较来看,两次气旋暴雨的风暴相对螺旋度各层SRH表现有相同点,也有不同点。

两次气旋暴雨在降雨开始前数小时中层SRH都达到了 $100 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ 并且较为稳定,表明在发展的气旋逐渐移近时,环境场的中层2~6 km的暖平流较强。随着气旋系统的移近,中低层SRH逐渐上升,说明中低层暖平流越来越强,从环境场流入气旋系统的环境水平涡度越来越多,通过上升运动将进入系统的中低层水平涡度转化为垂直涡度的越来越多,有利于垂直运动的维持,有利于气旋环流发展^[24]。这表明中低层SRH的变化对气旋降水系统的移近和降水的开始具有一定的预示作用。这个结论在一定程度上印证了陆慧娟等^[17]所指出的“水平螺旋度更具预示性,对预报强风暴有指示意义”的论断。

由准地转倾向方程可知,暖平流使低层气旋环流发展,高层反气旋环流发展。两次暴雨期间先是中层SRH增大到最大后,之后低层SRH增

大,中层SRH降低。说明较强的中层暖平流先是使得中层气旋环流逐渐加强。随着中层SRH由高走低,低层SRH增大,中层气旋环流减弱,低层气旋环流增强,表明气旋影响时存在着中层SRH向低层的传递的过程,从后面分析可以知道这个过程还对应着降雨强度的增强。

从图2还可看出,两次气旋暴雨过程时高层SRH在0线附近甚至为负值小于0,说明高空有水平涡度流出气旋降水系统,反映出高层气流处于辐散状态。我们知道在成熟气旋中低层有辐合,高层有辐散^[25]。这种高层SRH与中低层SRH的配置正是与低层辐合高层辐散的抽吸机制相对应,有利于上升运动的发展,从而导致暴雨的发生。

再对比两次气旋暴雨的SRH和雨强变化,还可以发现雨强与中低层SRH的峰值关系密切。两次暴雨过程中较强的雨强都出现在中层SRH两个峰值之间和低层SRH迅速增大的过程。例如:17日13:55~14:55时和31日4:00~5:00时。

从曲线形态上还可以看到,在气旋离开后各层SRH都迅速下降,曲线形态较为平滑,与上升阶段明显不同。表明暖平流影响期间环境气流中存在着频率较高的脉动,而冷平流影响期间环境气流风速较为一致脉动较小。

进一步分析两次暴雨过程的SRH与降水的关系,可以看到中低层SRH在两次气旋暴雨过程中的作用是不同的。

17日主要降水时段为9:25~21:10时。低层SRH于14:25时超过中层SRH,14:55时低层SRH达到最高 $376.2 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$,此时距离21:05时气旋中心最近时刻大约有6个小时左右时间,这段时间的降水量为45 mm。在这段时间里低层SRH的数值虽呈逐渐下降趋势,但是下降趋势比中层下降趋势要小,数值上也比中层SRH总体上要大。气旋中心于21:05时开始向东北移动远离上马站后,受气旋后部冷平流影响低层SRH迅速降低到0线以下,这次过程的降水也停止。表明17日的降水过程中低层SRH作用大于中层SRH。

在31日过程的主要降水时段30日23:05~31日10:15时中,低层SRH在31日7:20时才达到最高值 $507.3 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$,此时距离8:35时气旋中心最近时,只有约1小时左右时间,距离第一次降水停止

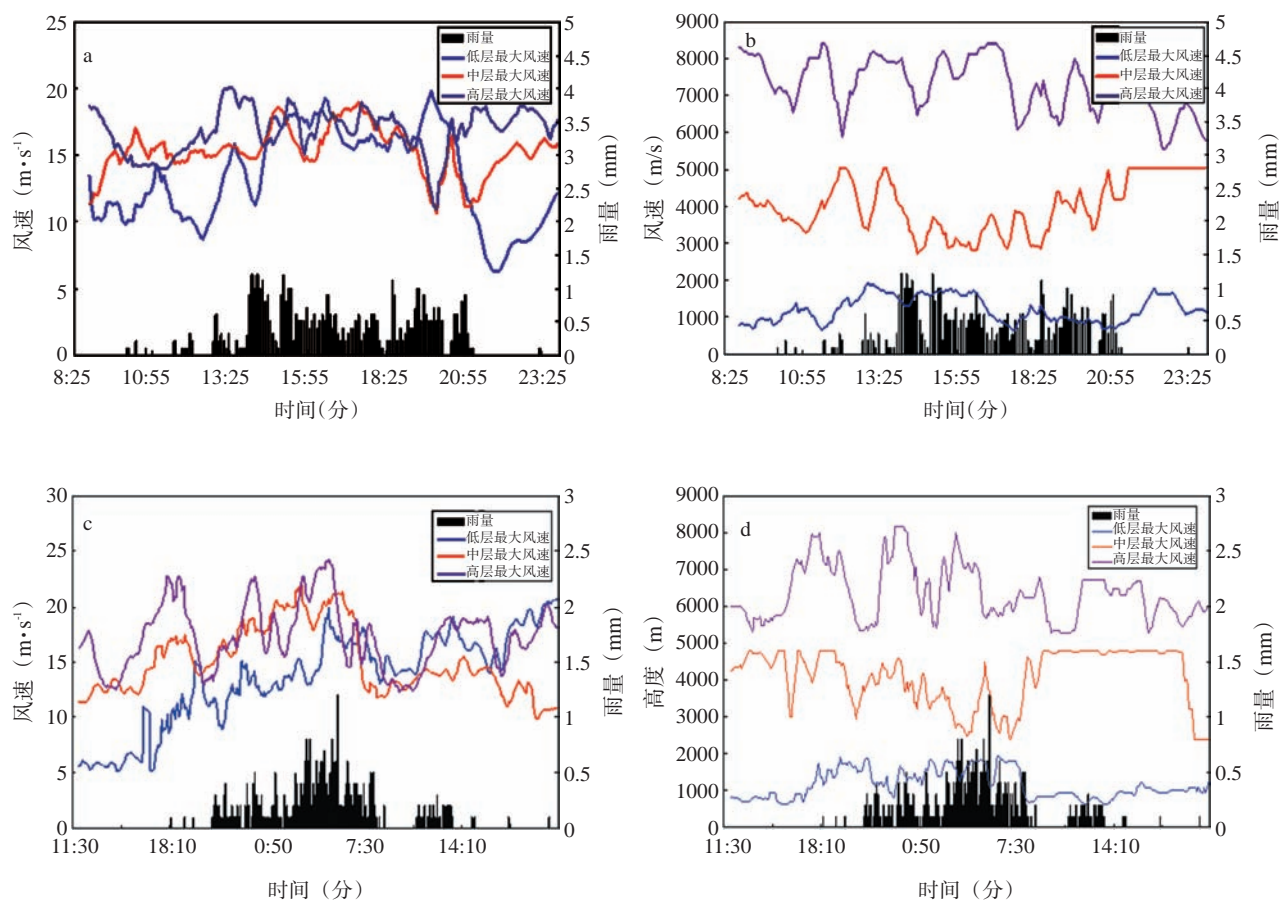


图3 2008年8月17日高、中、低三层最大风速(a)、最大风速高度(b)和
31日高、中、低三层最大风速(c)、最大风速高度(d)

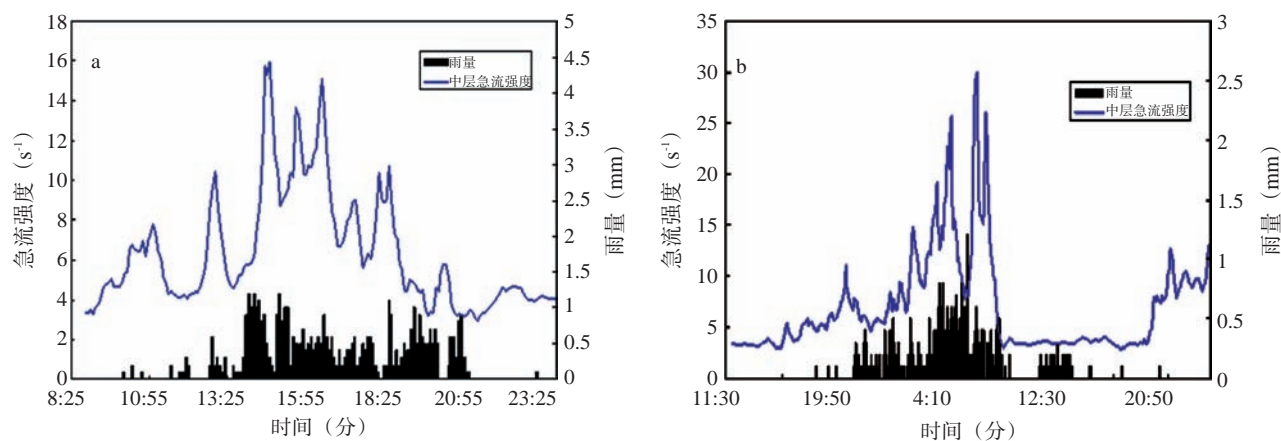


图4 2008年8月17日急流强度(a)和31日急流强度(b)

10:15时,大约有2个半小时。在30日23:05~31日7:00时这段降水期间中层SRH大于低层SRH,表明中层SRH起着主要作用。另外从图中还可以看出在31日11:05~13:30时的降水时段中则主要是低层SRH在起作用。

以上分析说明17日气旋影响时的低层SRH对降水起的作用大于中层SRH。31日的主要降水过程则是中层SRH作用大于低层SRH。从另外一个角度来说,17日的中低层SRH特征表明在气旋中心附近,环境场的低层SRH要大于中层SRH,说明气旋中心的低层暖平流大于中层暖平流。31日的中低层SRH特征表明,在气旋中心的西侧,中层SRH要大于低层SRH,表明在气旋中心的西侧的中层暖平流要大于低层暖平流。上述分析表明越接近气旋中心低层暖平流越强,强暖平流的高度越低。

3.3 急流的变化特征

低空急流对于暴雨的形成,一方面起着输送水汽和能量的作用,另一方面又有助于维持必要的动力学条件^[17]。刘淑媛^[1]、朱乾根、孙淑清、张京英、曹春燕、金巍^[19~25]等分别分析了低空急流脉动与暴雨过程关系,指出低空急流的脉动及向地面扩展程度与暴雨之间存在密切关系。低空急流到达测站上空不一定立刻引发强降水,每次强降水或强烈天气的发生都对应一次西南急流的迅速脉动加强和向下扩展。

为了分析17、31日两次暴雨过程急流,计算了高中低三层的最大风速,以及最大风速的高度,以此来对比各层急流的变化。

由图3可以看到,17日降水开始前,低层最大风速平均10 m/s左右,中高层平均15 m/s左右。降水开始后,低层风速逐步增大15 m/s以上,最大达到了18 m/s,三层最大风速逐渐趋于一致,差距不明显。随着气旋于21:05时以后逐渐离开上马,低层最大风速迅速降低,以后随着冷空气的到来又逐渐回升。

从各层最大风速的高度来看,17日6 km以上高层的最大风速高度变化不大,总体趋势略呈下降趋势。在降水期间中层最大风速高度先是下降然后向上升高,低层最大风速高度则先是向上升高,之后在降水后期向下降低。降水结束后,高

层的高度下降,中层升高,低层最大风速高度回升。

值得注意的是在降水期间,中低层最大风速高度逐渐靠近,之后又逐渐分开。从中低层SRH和最大风速的对比看到,14:40时低层SRH开始超过中层SRH时,中低层最大风速高度相差最小,说明中低层急流的急流高度逐渐靠近。在中低两层最大风速高度靠近时雨强也较强。

31日的降水中同样在降水前低层最大风速在三层中最小,随着降水的开始低层逐渐增大,最终在8:35时气旋最近时,超过高中层的最大风速。在降水过程中随着气旋的靠近,中低层最大风速的高度逐渐靠近,雨强也较大。随着气旋的离开,中低层最大风速的高度迅速拉开了距离。

以上分析显示出,两次气旋暴雨中在中低层的最大风速高度差距缩小时,表明中低层急流轴的变窄。急流轴的变窄的过程主要是中层最大风速高度的降低,表明偏南气流从中层向下的扩展程度,反映了动量的下传过程。这个过程对应着地面降雨强度的增大。说明中层急流向低层扩展的程度与降水的强度有密切关系。

根据以上分析可以定义急流强度=中层最大风速/(中低层最大风速高度差)。图4给出两次暴雨的急流强度。可以看出中层的急流强度与降水强度有着较好的对应关系。

4 小结

(1) 利用风廓线资料计算的风暴相对螺旋度能够清楚地反映出中低层暖平流的变化。中低层SRH的变化对气旋降水系统的移近和降水的开始具有一定的预示作用。高中低三层SRH的配置与低层辐合高层辐散的抽吸机制相对应;

(2) 在气旋暴雨过程中低层的SRH的作用各不相同。气旋中心附近的低层暖平流大于中层暖平流。在气旋的西侧,中层暖平流要大于低层暖平流,表明越接近气旋中心低层暖平流越强,强暖平流的高度越低。两次暴雨过程中较强的雨强出现在中层SRH两个峰值之间和低层SRH迅速增大的过程;

(3) 在两次气旋暴雨过程中存在中低层的最大风速高度差距缩小,也即中低层急流轴变窄的

过程。这个过程与暴雨的强度密切相关。据此计算得到的急流强度与降水强度有着较好的对应关系。

参考文献:

- [1] 刘淑媛,郑永光,陶祖钰.利用风廓线雷达资料分析低空急流的脉动与暴雨关系[J].热带气旋学报,2003,19(3):285-290.
- [2] 李晨光,刘淑媛,陶祖钰.华南暴雨试验期间香港风廓线雷达资料的评估[J].热带气象学报,2003,19(3):269-276.
- [4] 王欣,卞林根,彭浩等.风廓线仪系统探测试验与应用[J].应用气象学报,2005,16(5):694-698.
- [5] 杨引明,陶祖钰.上海LAP_3000边界层风廓线雷达在强对流天气预报中的应用初探[J].成都信息工程学院学报,2003,18(2):155-160.
- [6] 古红萍,马舒庆,王迎春.边界层风廓线雷达资料在北京夏季强降水天气分析中的应用[J].气象科技,2008,36(3):300-307.
- [7] 刘吉,范绍佳,方杏芹等.风廓线仪研究现状与应用初探[J].热带气象学报,2007,23(6):694-697.
- [8] 黄伟,张沛源,葛润生.风廓线雷达估测雨滴谱参数[J].气象科技,2002,30(6):334-337.
- [9] 张勇,王欣,徐祥德.大气廓线综合探测系统及其应用技术[J].气象科技,2004,32(4):263-268.
- [10] 李斌,杨晓霞,孙桂平等.青岛奥帆赛期间二个黄淮气旋暴雨对比分析[J].气象,2008,S1:38-46.
- [11] 章东华.螺旋度概念及其在强对流风暴预报中的应用试验[J].空军气象学院学报,1994,15(1):20-27.
- [12] 李英.春季滇南冰雹大风天气的螺旋度分析[J].南京气象学院学报,1999,22(2):19-20.
- [13] 胡园春,戴京笛,张艳红.一次暴雨过程的螺旋度场分析[J].山东气象,2005,25(3):17-18.
- [14] 王君,康雯瑛,张霞等.一次台风倒槽暴雨过程的螺旋度分析[J].气象与环境科学,2008,31(2):25-30.
- [15] 王丽荣,胡志群,匡顺四.应用雷达产品计算风暴相对螺旋度[J].气象,2006,32(4):46-50.
- [16] 刘健文,郭虎,李耀东等.天气分析预报物理量计算基础[J].气象出版社,2005:127-130.
- [17] 陆慧娟,高守亭.螺旋度及螺旋度方程的讨论[J].气象学报,2003,61(6):684-691.
- [18] 郑峰.螺旋度应用研究综述[J].气象科技,2006,34(2):119-123.
- [19] 中国北方暴雨丛书《华北暴雨》编写组.华北暴雨[M].气象出版社,1992:63-145.
- [20] 朱乾根.低空急流与暴雨[J].气象科技,1975,8:122.
- [21] 孙淑清,瞿国庆.低空急流的不稳定性及其对暴雨的触发作用[J].大气科学,1987,11(4):272-337.
- [22] 陆汉城.中尺度天气原理和预报[M].北京:气象出版社,2000:251-281.
- [23] 张京英,漆梁波,王庆华.用雷达风廓线产品分析一次暴雨与高低空急流的关系[J].气象,2005,31(12):41-45.
- [24] 曹春燕,江崑,孙向明.一次大暴雨过程低空急流脉动与强降水关系分析[J].气象,2006,32(6):102-106.
- [25] 金巍,曲岩,姚秀萍.一次大暴雨过程中低空急流演变与强降水的关系[J].气象,2007,33(12):31-38.