

阿克苏北部暴雨和冰雹湿位涡对比诊断分析^①

杨莲梅¹ 杨 涛²

(1. 中国气象局乌鲁木齐沙漠气象研究所, 830002; 2. 新疆专业气象台)

提 要

应用湿位涡理论, 分别对阿克苏北部 2 次暴雨和冰雹过程进行诊断分析。结果表明: θ_w 面陡立易导致湿斜压涡度发展, 形成 θ_w 陡峭密集区, 密集区内暴雨和冰雹容易发生; 850hPa MPV1 < 0 和 MPV2 > 0 以及 700hPa MPV1 > 0 和 MPV2 < 0, 易产生暴雨, 且 MPV1 和 MPV2 数量级相当, 即正压过程与斜压过程同样重要。冰雹发生时 850hPa MPV1 > 0 和 MPV2 < 0, 由于影响系统的不同, 700hPa MPV1 和 MPV2 分布有所不同, 但存在 MPV1 和 MPV2 的正负配置, 有利于倾斜涡度发展。

关键词: 湿位涡 倾斜涡度 暴雨 冰雹

引 言

阿克苏地区位于天山中段南麓, 塔克拉玛干大沙漠的北缘, 海拔 1000m 左右, 属大陆型干旱气候, 平均年降水量仅为 72.6mm, 是新疆强对流天气的高发区之一。人类集中活动的区域仅限于山地和荒漠两大生态系统之间因天然或人为利用水资源发展起来的绿洲带, 形成了独特的冰雪—绿洲—沙漠生态景观。该地区以农业为经济主体, 是国家“八五”与“九五”期间建设的国家级棉花基地、新疆重要的粮食和名优果品基地, 然而突发性暴雨造成的洪水和冰雹危害十分严重。

湿位涡是同时表征大气动力、热力和水汽性质的综合物理量。近年来, 其概念和理论得到了深入的研究和应用。吴国雄等^[1,2]从完整的原始方程出发, 导出了湿位涡方程, 证明了绝热无摩擦的饱和大气中湿位涡的守恒性, 并由此研究了等熵坐标和等压坐标系中倾斜涡度的发展理论; 文献[3~9]依据倾

斜涡度发展理论, 分别对我国锋面强降水、江淮暴雨及台风等进行了湿位涡诊断研究, 认为包含水汽凝结潜热作用的湿位涡诊断量对暴雨和冰雹天气有较好的指示意义。本研究以 2 次暴雨和 2 次冰雹为例, 探讨这一理论在新疆干旱区暴雨和冰雹天气中的应用, 应用 00 和 12 时的 925、850、700、500、400 和 300hPa 高空观测资料, 以 40°N、80°E 为中心进行麦卡托投影进行 1°×1°最优插值客观分析, 计算湿位涡并对各分量特征进行分析, 探讨干旱地区湿位涡与暴雨和冰雹关系及其表征, 并进行对比分析。

1 湿位涡及倾斜涡度发展理论

湿位涡及倾斜涡度发展理论忽略 ω 的水平变化, p 坐标下湿位涡 (Moist Potential Vorticity, 简称为 MPV) 守恒方程为:

$$MPV = -g(\zeta_p + f) \frac{\partial \theta_w}{\partial p} +$$

^① 基金项目: 国家科技部社会公益研究专项(塔里木河流域气候暖湿化及人类活动对地表水资源的影响), 国家科技部重大基础研究前期研究专项(2002cca04600)和新疆气象局青年基金课题(C20010724)。

$$g \frac{\partial v}{\partial p} \frac{\partial \theta_w}{\partial x} - g \frac{\partial u}{\partial p} \frac{\partial \theta_w}{\partial y} = \text{常数} \quad (1)$$

将其写成分量形式:

$$MPV1 = -g(\zeta_p + f) \frac{\partial \theta_w}{\partial p} \quad (2)$$

$$MPV2 = g \frac{\partial v}{\partial p} \frac{\partial \theta_w}{\partial x} - g \frac{\partial u}{\partial p} \frac{\partial \theta_w}{\partial y} \quad (3)$$

其中 $MPV1$ 是湿位涡的垂直分量,其值取决于空气块绝对涡度的垂直分量与假相当位温的垂直梯度的乘积(ζ_p 为垂直方向涡度, θ_w 为假相当位温),为湿正压项,北半球大气对流不稳定时, $\frac{\partial \theta_w}{\partial p} > 0$, $MPV1 < 0$; 大气对流稳定时, 则有 $\frac{\partial \theta_w}{\partial p} < 0$, $MPV1 > 0$ 。

$MPV2$ 是湿位涡在等压面上的水平分量,为湿斜压项,它的数值由风的垂直切变和 θ_w 的水平梯度决定。在湿位涡守恒的制约下, θ_w 面倾斜越大,气旋性涡度越剧烈。这种涡度的增长称为倾斜涡度发展。

文献[1]给出垂直涡度增长的充分条件为: $MPV2 / \frac{\partial \theta_w}{\partial p} > 0$ 。据此,在大气为对流不稳定条件下 ($\frac{\partial \theta_w}{\partial p} > 0$), 只有 $MPV2 > 0$ 垂直涡度才能得到较大增长; 大气为对流稳定 ($\frac{\partial \theta_w}{\partial p} < 0$), 则只有 $MPV2 < 0$, 垂直涡度才能得到较大增长。因此 θ_w 面的陡立是倾斜涡度发展的重要条件。

2 暴雨和冰雹个例湿位涡特征

1999年8月13日和7月4日200hPa高空急流和500hPa副热带锋区均位于40°~44°N, 8月13日500hPa中亚地区有一次天气尺度的低槽东移影响新疆北部和阿克苏北部绿洲, 同时850hPa塔克拉玛干沙漠东部有一支低空偏东急流伸到阿克苏北部暴雨区, 在天气尺度系统中激发中尺度系统, 致使库车和拜城于13日14~20时(北京时, 下

同)降了19.0mm和23.5mm的暴雨, 而库车8月平均降水量仅为11.3mm。7月4日500hPa中纬为纬向环流, 锋区上有一弱槽, 同样850hPa也有低空偏东急流伸到暴雨区, 阿克苏7月5日05~08时出现16.4mm的暴雨, 而该站7月平均降水量仅为15.4mm。1999年5月2日和28日40°~44°N同样存在200hPa高空急流和500hPa副热带锋区, 2日500hPa为平直的纬向环流, 锋区上有弱槽东移, 库车和新和县出现冰雹。28日巴尔喀什湖有一低槽翻越天山南下, 库车、沙雅和拜城一带出现冰雹, 受灾2300hm², 绝收2000hm²。

2.1 假相当位温剖面特征

由公式(1)可知, 在湿位涡守恒的制约下, 由于 θ_w 面的倾斜, 大气水平风垂直切变或湿斜压性的增大能够导致垂直涡度的显著发展, 倾斜越大, 气旋性涡度越强, 越容易造成强对流天气的发生。图1a、b给出了2场暴雨沿80°E θ_w 垂直分布, 其共同特点是地面到850hPa暴雨区有强的对流不稳定 ($\frac{\partial \theta_w}{\partial p} > 0$), 暴雨区以南有强的 θ_w 高中心, θ_w 陡峭密集随高度向北倾斜, 表明低层冷空气较弱, 而暖湿气流较强, 东南低空急流向北输送强暖湿空气所致。700hPa有较明显的冷空气向暴雨区侵袭, 暴雨区北部有 θ_w 低中心, 地面到500hPa暴雨区上空形成 θ_w 陡峭和密集区, 850hPa以上 θ_w 陡峭密集区内等值线几乎垂直。两次天气影响系统不同, 中亚槽系统的 θ_w 密集度和陡峭程度、地面到850hPa的对流不稳定程度均大于锋区小槽系统, 造成的降水量也大些。

图1c、d为2次冰雹沿83°E θ_w 垂直分布, 地面到500hPa(甚至到400hPa)雹区上空为 θ_w 陡峭密集区且 θ_w 线几乎垂直, 北方冷空气从地面到500hPa表现得比暴雨影响时强,

南方的暖湿空气强度和湿润程度均比暴雨影响时弱。雹区的稳定性很弱,相应 θ_w 面更为陡立,更有利于垂直涡度发展。由此可见冰雹和暴雨天气的 θ_w 垂直分布既有共性也有差别,都位于 θ_w 陡峭密集区,但暴雨天气地面到 850hPa 暴雨区 θ_w 很密集且陡峭小,有强对流不稳定, θ_w 陡峭密集区从 850hPa ~

500hPa, θ_w 密集度比冰雹强,陡峭程度不如冰雹,而冰雹天气 θ_w 陡峭密集区从地面伸展到 500hPa 甚至 400hPa(几乎垂直)。冰雹与暴雨对流层低层 θ_w 分布的差异主要是由于暴雨时存在一支低空急流,而冰雹却不存在低空急流造成的,这是新疆天气特点。

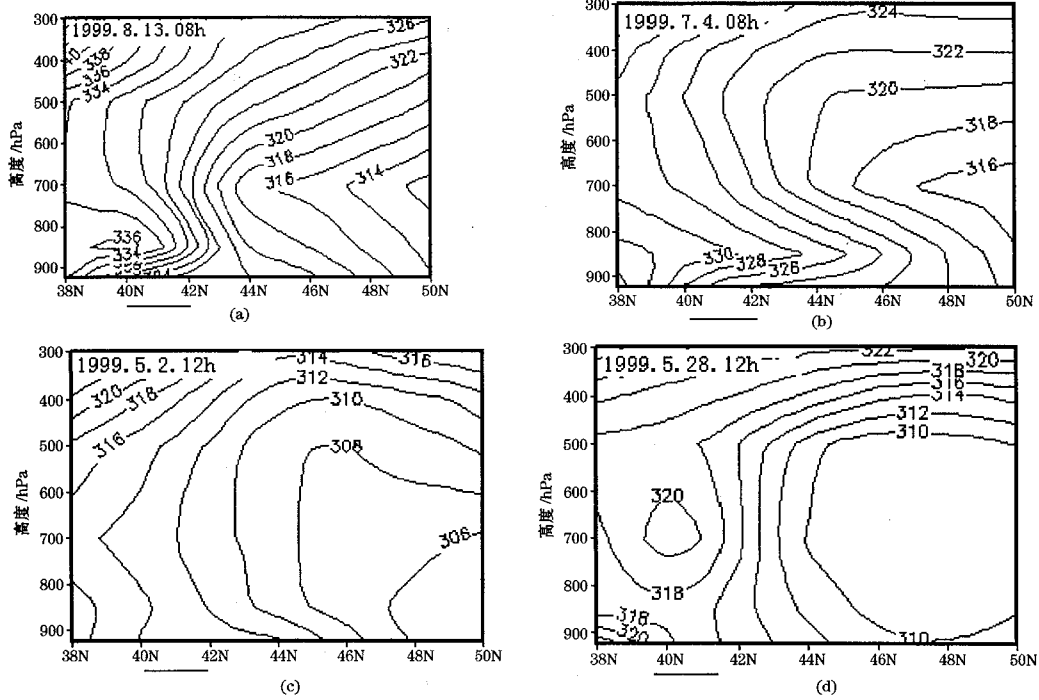


图1 沿 80°E(a,b) 和 83°E(c,d) 剖面的 θ_w 垂直分布

(图下粗实线为暴雨区和冰雹区的纬向跨度, θ_w 单位:K)

2.2 等压面上的湿位涡分布

图2为两次暴雨 850hPa 湿位涡分布,暴雨区位于范围较小的 MPV1 强负值区域中心(对流不稳定),而暴雨区周围均为正值区(对流稳定),它反映了暴雨区具有局地的强湿对流不稳定层结,对流不稳定主要是由狭窄的偏东低空急流携带的暖湿气流所致。同时暴雨区位于 MPV2 的正负交界锋区内正值侧,根据倾斜涡度发展理论,在大气为对流不稳定的条件下,须 $MPV2 > 0$ 垂直涡度才能得到较大增长,这种 MPV1 与 MPV2 的

配置有利于强对流的发生。MPV2 的数值量级与 MPV1 相当,说明湿斜压作用很强与湿正压作用相当,这可能是新疆的地区特点,与其它地区暴雨的湿斜压项比湿正压项小一个量级不同^[7-9]。中亚槽系统的 MPV1 负中心和 MPV2 正中心强度比锋区小槽系统强,造成的降水强度也强,暴雨结束后,这种低层 $MPV1 < 0$ 和 $MPV2 > 0$ 的分布不存在。

从 700hPa 湿位涡的分布来看,其特点与 850hPa 相比有所不同(图略)。700hPa 的

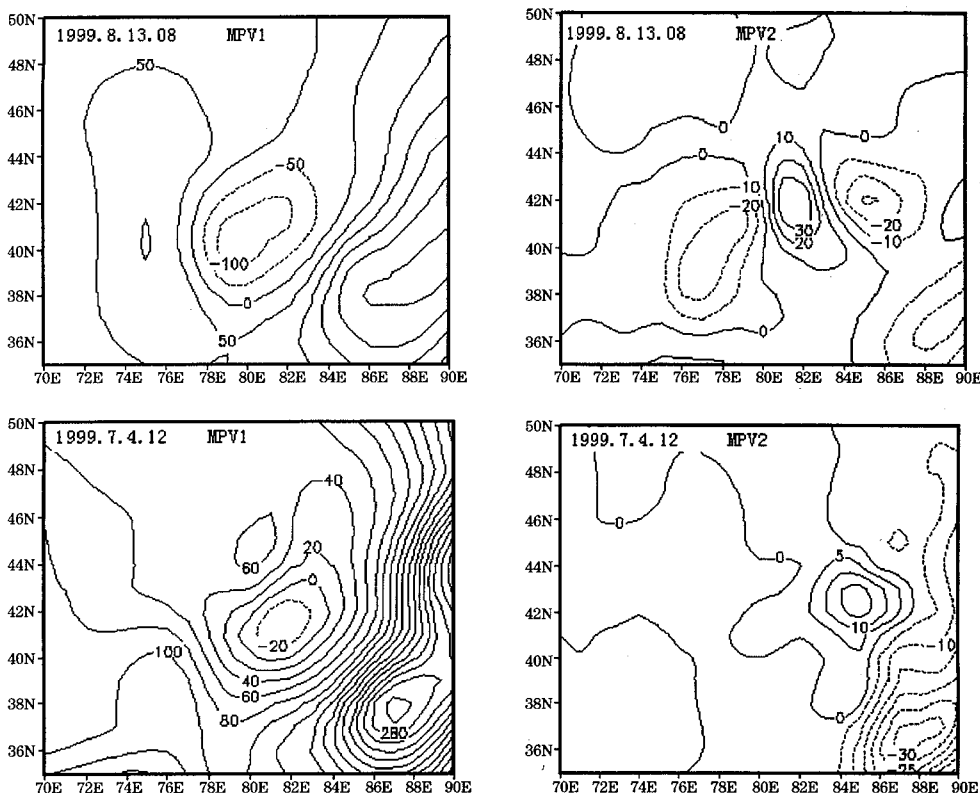


图2 1999年8月13日和1999年7月4日850hPa MPV1和MPV2分布(单位: $10^{-6} \text{m} \cdot \text{s}^{-3} \cdot \text{K} \cdot \text{hPa}^{-1}$)

MPV1和MPV2的分布与850hPa相反,在此层上暴雨区位于MPV1 > 0的锋区上和MPV2 < 0中心,说明暴雨发生时对流不稳定层未达700hPa, θ_w 垂直廓线上850hPa有一 θ_w 极大值,700hPa有一 θ_w 极小值,这种结构反映的大气稳定性质与MPV1反映的情况是一致的,随着冷空气南移,暴雨区上空冷空气增厚,850hPa上 θ_w 值减小,地面到850hPa之间的不稳定度减弱,当整个对流层的MPV1均为较强的正值区时,暴雨天气结束。虽然700hPa为对流稳定,但MPV2 < 0,根据倾斜涡度发展理论,MPV1 > 0和MPV2 < 0的配置有利于垂直涡度的增长,且该层MPV2的数值量级与MPV1相当,说明湿斜压作用在700hPa也很强。由此可见虽然对流不稳定层较浅薄,但850hPa和700hPa湿位涡的湿正压项和湿斜压项配置

有利于垂直涡度的发展,且湿斜压项的数量级与湿正压项相当。暴雨的物理机制可以理解为在高空急流的作用下,高位涡空气(代表冷空气)向东南扩展,低层的高位涡气流(代表暖空气)在低空急流的作用下向西北输送,在冷暖空气的交汇处形成斜压锋区,产生湿斜压不稳定,触发不稳定能量的释放,使得暴雨发生。

图3为两次冰雹850hPa湿位涡分布,850hPa以下雹区存在弱对流稳定,850hPa雹区位于MPV1锋区正值侧,且MPV2 < 0区,在MPV1“锋区”上,对流稳定度较弱或为中性,相应 θ_w 面更为陡立,更有利于垂直涡度发展。MPV2的数值量级比MPV1小一个量级,但 θ_w 的陡立和暖气流偏南风与冷气流偏北风之间形成较强的风垂直切变使得湿斜压度的增强,随着斜压性的增强,也就是

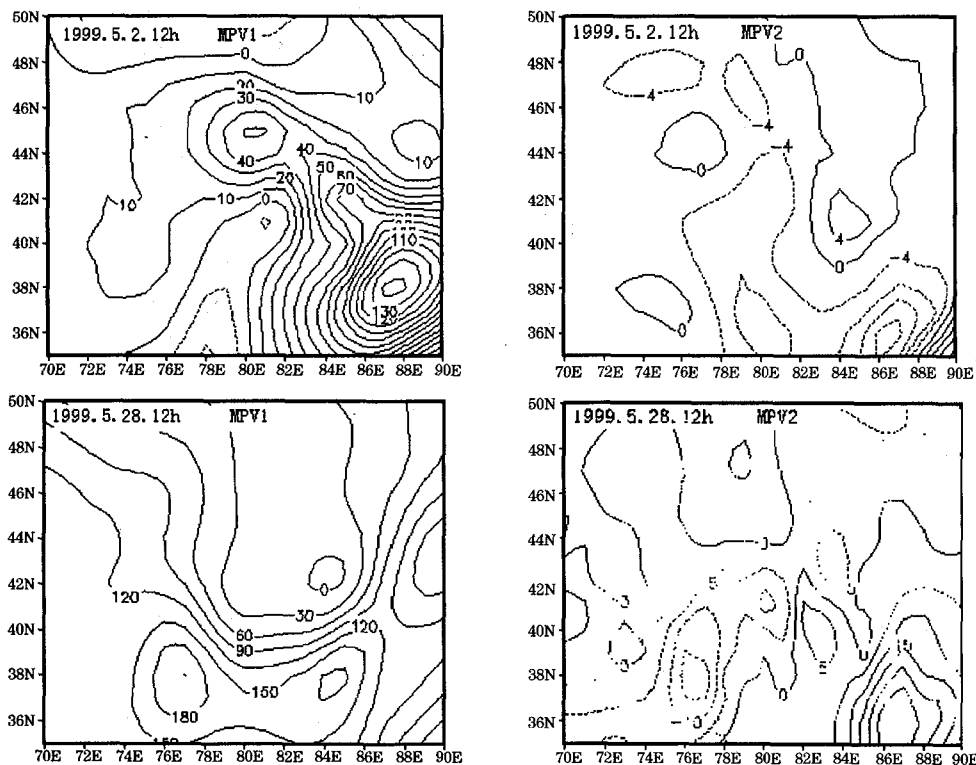


图3 1999年5月2日和1999年5月28日850hPa MPV1和MPV2分布(单位: $10^{-6} \text{m} \cdot \text{s}^{-3} \cdot \text{K} \cdot \text{hPa}^{-1}$)

风的垂直切变和位温的水平分布达到最佳配置时,出现冰雹天气。当冰雹天气结束时 θ_{se} 陡立面、 $MPV1 > 0$ 和 $MPV2 < 0$ 的配置不存在(图略)。

2场冰雹700hPa的MPV1和MPV2分布(图略)。1999年5月2日雹区位于 $MPV1 > 0$ 的锋区上,同时 $MPV2 < 0$ 中心,这种分布配置与850hPa相同,虽然对流稳定层能达到700hPa,但都位于锋区上,说明其稳定度较弱,配合 $MPV2 < 0$ 和 θ_{se} 陡峭密集区且 θ_{se} 线几乎垂直有利于倾斜涡度的发展。1999年5月28日雹区位于 $MPV1 < 0$ 中心和 $MPV2 > 0$ 中心,与850hPa相反,低层为湿对流稳定而中层为湿对流不稳定的特征正是暖湿空气被抬升的反映,冰雹日 θ_{se} 垂直廓线图也可以说明这一点, θ_{se} 垂直廓线上700hPa有一 θ_{se} 极大值,这种结构反映的大

气稳定性质与MPV1反映的情况是一致的,随着冷空气南移,降雹区上空冷空气增厚,700hPa上 θ_{se} 值减小,850~700hPa之间的不稳定度减弱,当整个对流层的MPV1均为较强的正值区时,冰雹天气结束。700hPa MPV2的数值量级比MPV1小一个量级, θ_{se} 的陡立有利于垂直涡度的发展。这两次冰雹天气不稳定区别的主要原因是影响系统不同,5月2日为锋区小槽冷暖空气强度均较弱,冷空气对暖气团的强迫抬升也弱,对流稳定度也弱。5月28日为北支槽,冷空气较强但浅薄常造成低层的对流稳定层结,对暖气团有强迫抬升作用,故使 $MPV1 < 0$ 同时 $MPV2 > 0$ 的区域出现在较高层次。暴雨发生时,低层有明显的暖湿低值系统,中层有冷槽活动,且水汽充沛深厚,故低层有明显的 $MPV1 < 0$ 且 $MPV2 > 0$ 的区域,中层有明显的 $MPV1 > 0$ 且 $MPV2 < 0$ 的区域。冰雹

发生时暖性低值系统较干,冷槽活动较强,低层有明显的 $MPV1 > 0$ 且 $MPV2 < 0$ 的区域,中层 $MPV1$ 和 $MPV2$ 分布不同,但其配置符合倾斜涡度发展理论,且 θ_e 更陡立。

3 小结

对阿克苏北部绿洲暴雨和冰雹个例的湿位涡诊断分析,暴雨和冰雹 850hPa 和 700hPa $MPV1$ 和 $MPV2$ 的配置有利于倾斜涡度发展,但它们有显著的差别。暴雨 850hPa $MPV1 < 0$ 且 $MPV2 > 0$, 700hPa $MPV1 > 0$ 且 $MPV2 < 0$, $MPV1$ 和 $MPV2$ 的数量级相当,说明湿斜压作用相当强。冰雹由于影响系统的不同 $MPV1$ 和 $MPV2$ 的分布不同,锋区小槽系统 850hPa $MPV1 > 0$ 且 $MPV2 < 0$, 700hPa 为同样的分布,但雹区位于 $MPV1 > 0$ 锋区上,对流稳定性弱,同时 θ_e 更陡立且 $MPV2 < 0$, 导致倾斜涡度发展。中亚槽系统 850hPa $MPV1 > 0$ 且 $MPV2 < 0$, 700hPa 分布相反。湿位涡两个分量判据十分清楚地将大气中两种不稳定机制,即对

流不稳定和斜压不稳定联系在一起,并为强对流天气诊断和实际预报提供了一种思路。

参考文献

- 1 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.
- 2 吴国雄,蔡雅萍. 风垂直切变和下滑倾斜涡度发展. 大气科学,1997,21(3):273~281.
- 3 王建中,马淑芬,丁一汇. 位涡在暴雨成因分析中的应用. 应用气象学报,1996,7(1):19~27.
- 4 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):275~284.
- 5 王淑静,周黎明,陈高峰. 解释台风暴雨落区判据探讨. 应用气象学报,1997,8(2):167~174.
- 6 李国平,刘行军. 西南低涡暴雨的湿位涡诊断分析. 应用气象学报,1994,5(3):354~360.
- 7 于玉斌,姚秀萍. 对华北一次特大台风暴雨过程的位涡诊断分析. 高原气象,2000,19(1):111~120.
- 8 段旭,李英. 滇中暴雨的湿位涡诊断分析. 高原气象,2000,19(2):253~259.
- 9 赵宇,杨晓霞,孙兴池. 影响山东的台风暴雨天气的湿位涡诊断分析. 气象,2004,30(4):15~19.

Diagnostic Analysis of Moist Potential Vorticity for Heavy Rainfall and Hail in Oasis of Northern Akesu

Yang Lianmei¹ Yang Tao²

(1. Urumqi Institute of Desert Meteorology, CMA, Xinjiang Urumqi 830002,

2. Xinjiang Professional Meteorological Observatory)

Abstract

The characteristics of moist potential vorticity are analyzed during two heavy rainfall and two hail events in Northern Akesu. The results show that the stiff moist isentropes excite the development of moist slantwise vorticity and occurrence of heavy rainfall and hail. When $MPV1 < 0$ and $MPV2 > 0$ at 850hPa and $MPV1 > 0$ and $MPV2 < 0$ at 700hPa, sudden heavy rainfall probably happen. The order of magnitudes of $MPV1$ and $MPV2$ is equivalent. When hail occurred, there are $MPV1 > 0$ and $MPV2 < 0$ at 850hPa. Because of the difference of affective systems, there are different distributions for $MPV1$ and $MPV2$ at 700hPa, but reverse of $MPV1$ and $MPV2$ lead the development of slantwise vorticity.

Key Words: moist potential vorticity slantwise vorticity development heavy rainfall hail