

# 一次青藏高原东侧大暴雨 过程的诊断分析

王 川

寿绍文

(陕西省气象台,西安 710015)

(南京气象学院)

## 提 要

利用常规的探空和地面观测资料以及中尺度模式所提供的高时空分辨率资料,对2002年6月8~9日发生在青藏高原东侧陕西省的一次罕见大暴雨过程的环流形势及位涡场特征进行了诊断和分析。结果表明,湿位涡的时空演变对中尺度气旋及暴雨的发生发展有指示意义,强降水发生在对流层低层较大的正负湿位涡区域交界处,中尺度气旋的迅速发展与对流层高层位涡扰动的下传有密切联系。

**关键词:** 暴雨 湿位涡 诊断分析

## 引 言

2002年6月8~9日,青藏高原东侧的陕西省及四川省东北部遭遇一次暴雨—特大暴雨过程(以下简称为“02.6暴雨”),这是一次高层冷空气与低层中尺度低涡和地面气旋相互作用而产生的较为典型的陕西前汛期暴雨,中尺度系统在其中起到了关键作用。大

暴雨的形成需要有丰富的水汽供应以及有利的动力、热力不稳定条件,位涡作为一个将动力和热力作用相结合的物理量,对暴雨的发生发展过程有较好的指示性。Hoskins<sup>[1]</sup>指出,当对流层上部或平流层的位涡扰动下传影响到对流层下部时可引起地面的气旋发展,当湿位涡为负值时有可能出现对称不稳

定。近年来,在解释降水机理方面,普遍的观点认为位涡场比涡度场更能表现暴雨的落区和强度的变化,湿位涡比其他几种位涡形式更能反映暴雨的物理机制,可以利用对流层低层湿位涡的符号与数值来判断强降水的落区,位涡理论已被广泛应用于江淮梅雨锋暴雨<sup>[2]</sup>、华南暴雨<sup>[3]</sup>、台风暴雨<sup>[4]</sup>、西南涡暴雨<sup>[5]</sup>、渤海湾暴雨<sup>[6]</sup>的诊断研究,并得到一些有意义的结论。

陕西毗邻青藏高原,地域南北狭长,秦岭横贯东西,地形复杂,气候多样。本文用中尺度模式 MM4 对此次暴雨过程进行数值模拟,利用模式输出的细网格资料,计算湿位涡,仔细考察暴雨过程中湿位涡的演变情况,对内陆地区大暴雨过程湿位涡的演变与中尺度涡旋发生发展及暴雨产生的原因作一些初步探讨。

## 1 02.6 暴雨天气过程概况

此次暴雨过程持续时间短、降水强度大、降雨比较集中。陕西境内降雨涉及全省 98 个县,降雨量在 50~100mm 的有 39 个县,汉中佛坪县最大 24 小时雨量达 489.2mm,其中 8 日 21 时 50 分至 9 日 03 时,5 小时降雨量达 328.5mm,高强度降水导致严重山洪并诱发滑坡、泥石流灾害,造成 300 余人死亡。内陆地区出现如此大强度、大范围的降水实属罕见,此次强降雨过程已引起全社会的关注。

### 1.1 降水的时空分布

本次暴雨有两条明显雨带(见图 1),一个位于陕北长城沿线,6 月 8~9 日 24 小时降水量为 60~90mm,最大降雨量在榆林横山站,为 88.9mm,另一条位于陕西西南部的汉中至四川东北部,24 小时雨量为 80~200mm,最大降雨量在汉中佛坪站。此次过程两条雨带正是陕西的两条多暴雨带:长城沿线和汉江河谷<sup>[7]</sup>。

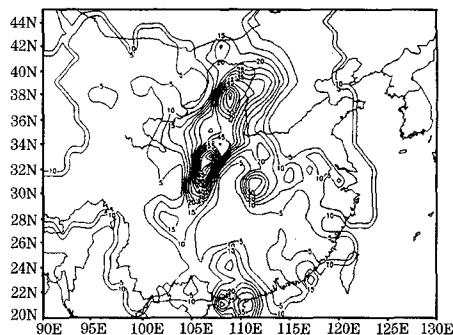


图 1 2002 年 6 月 8 日 08 时~9 日 08 时

24 小时降水量实况

单位:mm

### 1.2 环流形势特征

6 月 8 日 08 时、20 时对流层高层 200hPa 在陕西关中至陕北有明显的西南高空急流出现,300hPa 40°N 附近维持一支明显的偏西风急流,南北尺度较小,急流带狭窄,8 日 08 时 850hPa 四川至陕南也有明显的南风急流出现,它们对暴雨形成起着非常重要的作用。500hPa 暴雨产生期间 8 日 08 时至 9 日 08 时中高纬为两槽一脊型,700hPa 东北至华北、新疆及青藏高原为两个高压中心,两高之间为大范围低值系统,四川西部的低涡加深北抬,形成东北风与西南风及西北风与西南风的人字形切变,大降水区出现在人字形切变两侧。8 日地面形势图上东亚形成一明显鞍型场,高原东侧处于两高之间地面倒槽中,西路冷锋进入鞍形场后加强,移速减缓,与华北高压带来的冷空气相遇形成锢囚锋。

### 1.3 次天气尺度 $\Omega$ 系统与降水的关系

图 2 为 6 月 8 日 20 时 850hPa  $\theta_e$  图,图中可清楚看到一个  $\Omega$  型的次天气尺度系统。 $\Omega$  型分布反映了低层三股中尺度气流的相互作用,这种情形类似天气尺度的锢囚锋,但  $\Omega$  型暴雨系统的尺度小。由南向北伸的高能轴往往反映一股向北爬升的暖湿气流,它不但是产生暴雨所必需的水汽输送带,也是造成暴雨强对流所必需的位势不稳定能量的输送

者。此次降雨过程东侧低能轴是倒灌的东路冷空气,有阻挡暖湿气流向东扩散、使低层辐合加强的作用。这股冷空气同时也是下沉气流,对暴雨的出现有重要作用。在图2中,我们还可清楚地看到高能轴西侧的低能轴,这股冷空气在8日14时的地面图上表现并不明显,弱于东路冷空气,这股向东南爆发的干冷空气的冲击,使高能轴附近形成明显的辐合流场,它触发高能轴附近不稳定的高湿气流强烈地对流上升。陕西、四川大暴雨区恰好位于 $\theta_e$ 高值区的右拐处(30~35°N、105~110°E),此处 $\theta_e$ 面陡立,梯度较大,降水在高能轴附近的等值线密集带即低能轴夹击处出现。

#### 1.4 暴雨过程的数值模拟

图3为MM4模式输出的8日08时~9

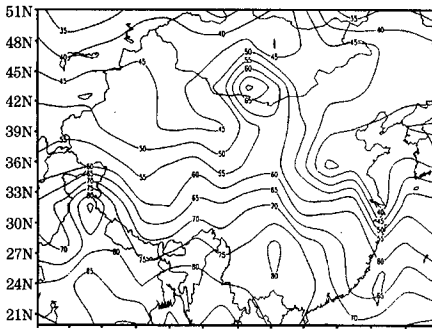


图2 2002年6月8日20时850hPa的 $\theta_e$ 分布图  
单位:℃

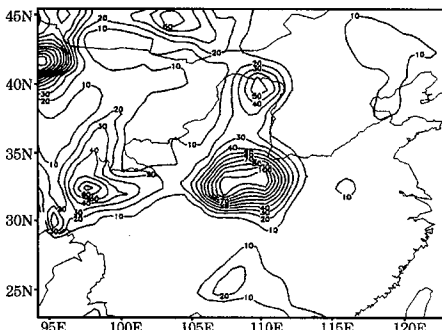


图3 2002年6月8日08时~9日08时  
模式输出的24小时雨量场  
单位:mm

日08时24小时雨量场,与实际雨量相比较,大的雨量带基本吻合,模拟出了此次降水的两个主要雨带,即陕北雨带和汉江、四川北部雨带,只是陕北雨带较实际雨带位置偏北,量级相当,陕南雨带中心范围稍偏大,位置稍偏东,模拟出了100mm的降水中心。可以认为MM4模式对此次暴雨过程有较强的模拟能力,利用模式输出的细网格动力协调资料进行暴雨的诊断研究,能够反映暴雨及其系统的发展演变及形成机制,得到比较可靠的结论。

#### 2 暴雨过程中湿位涡的诊断分析

湿位涡可表示为:

$$mpv = -g(\zeta + f) \frac{\partial \theta_e}{\partial p} + g \left( \frac{\partial v}{\partial p} \frac{\partial \theta_e}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial p} \frac{\partial \theta_e}{\partial y} \right) \quad (1)$$

其中 $\zeta$ 为相对涡度, $\theta_e$ 为相当位温, $f$ 为柯氏参数, $-g \frac{\partial \theta_e}{\partial p}$ 表示静力稳定度。湿位涡这一物理量不仅表征了大气动力、热力属性,而且考虑了水汽的作用,所以通过对湿位涡进行诊断,可以揭示热力和动力条件与降水的关系。

沿此次暴雨最大中心汉中佛坪站(34°N、108°E)的经度108°E作2002年6月8日08时~9日08时每隔3小时 $mpv$ 的垂直剖面图。从图中可以看出对流层中低层 $mpv$ 的分布演变情况与此次暴雨发生发展有密切的对应关系:在暴雨增幅的前期,对流层中低层 $mpv$ 即出现负值区,暴雨区南侧有大的 $mpv$ 负值区维持,14时中心值接近-3PVU(1PVU=10<sup>-6</sup>m<sup>2</sup>·s<sup>-1</sup>·K·kg<sup>-1</sup>),且中心抬升至850hPa,负值区抬升至500hPa(图4a)。在暴雨增幅期,暴雨区南侧的 $mpv$ 负值区增强,中心抬升至700hPa,同时雨区上空17时出现的正值 $mpv$ 区域明显增大,强度增强,但 $mpv$ 正值的大小明显弱于 $mpv$ 负中心的

绝对值(图 4b)。暴雨发生在正、负  $mpv$  区域交界密集区,此形势维持 3~5 小时,与大暴雨发生时间一致。暴雨消亡期,500hPa 以下又为整片的  $mpv$  负值覆盖,但负值中心为 -1PVU,此时雨强明显减弱(图 4c)。当 500hPa 至近地层  $mpv$  负值区消失时,整个降水结束(图略)。通过分析我们发现,暴雨

区及其南侧的  $mpv$  负值区,即对流不稳定区域是产生暴雨的必要条件,但大降水出现在和  $mpv$  负值区相邻的  $mpv$  正值区出现后,大降水落区和  $mpv$  正负两大值区位置密切相关,因此对流层中低层  $mpv$  的数值和符号可作为指示强降水带的走向及落区的一个因子。

在以往陕西暴雨的过程分析中,我们常常利用高空锋区和地面锋面来判断冷空气的活动,新疆东移的西路冷空气是陕西降雨的主要冷空气来源,而此次暴雨过程却无法分析出明显的西路冷空气,相反东路冷空气起到了关键作用。根据 Hoskins 位涡理论,可以认为负的湿位涡代表不稳定的暖湿气流,正的位涡用来示踪冷空气活动。

在本次暴雨的分析过程中,发现 700hPa 湿位涡正值区变化可以反映东路冷空气的活动情况,对应此次暴雨 700hPa 低涡生成处一直维持较大范围的  $mpv$  负值区,负值中心最大可达 -4PVU,基本与 700hPa 低涡中心重合。从图 5 可看到,陕西省大部分地区为  $mpv=0$  线控制,此时华北高压稳定,东路冷空气路径与  $mpv$  正值区位置一致,此正值区与青藏高原至河套西部的两个  $mpv$  负大值区形成梯度密集区,在  $mpv$  等值线相对密集的 0 线附近,正是冷暖空气交汇地带,陕南和川北位于  $mpv$  正值区边界 0 线附近,23 时至 9 日 03 时为陕南和川北雨强最大时。05 时,华北高压减弱东移,  $mpv$  形势变化也较大,  $mpv$  正值区东移,陕南和川北为  $mpv$  负值区控制,降雨强度随  $mpv$  正值区中心值的减弱而减弱,暴雨区位置随  $mpv$  正值区位置的东移而东移,但暴雨区始终位于正  $mpv$  区域西侧与负大值  $mpv$  区域的交界处。在暴雨最强盛期,  $mpv$  负值区可达到 -4PVU,但  $mpv$  正值区的中心值在 700hPa,最大只是 1PVU。

### 3 暴雨过程中扰动湿位涡场对中尺度气旋

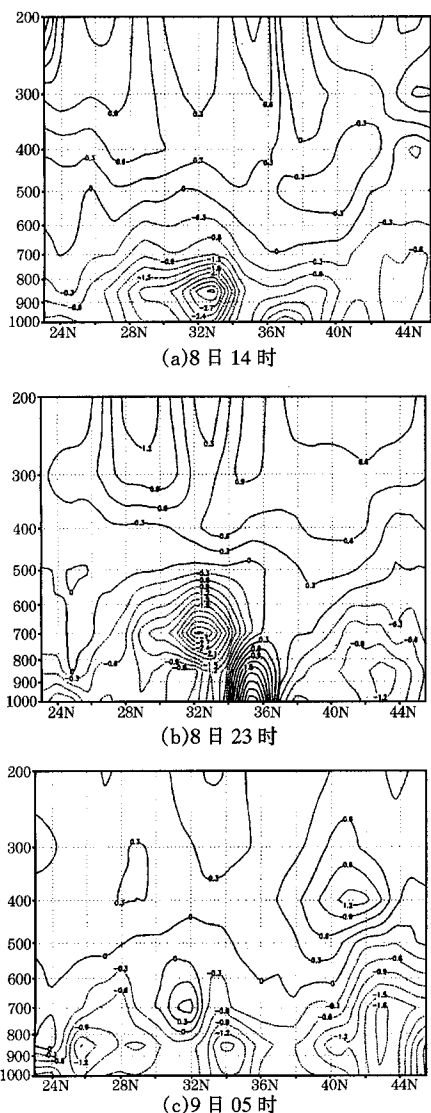
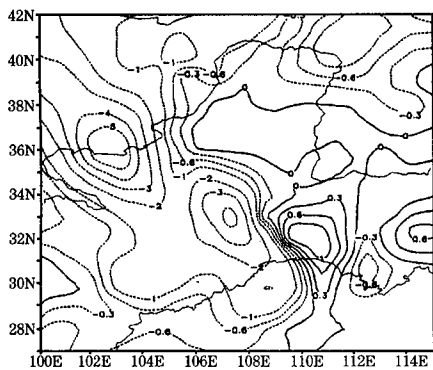


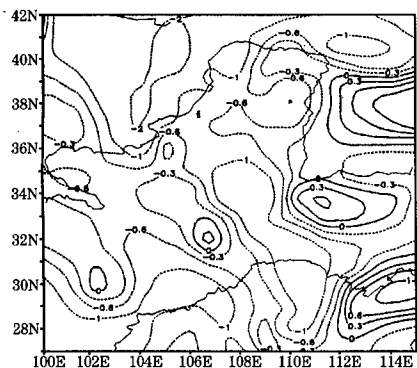
图 4 2002 年 6 月 8 日 14 时、23 时、9 日 05 时沿 108°E 湿位涡垂直剖面图  
单位:PVU

的影响

我们把湿位涡瞬时值  $mpv$  与 24 小时平均值  $(\overline{mpv})$  的差值定义为湿位涡扰动量  $(mpv)'$ 。即  $(mpv)' = mpv - (\overline{mpv})$ 。



(a)8日 23时



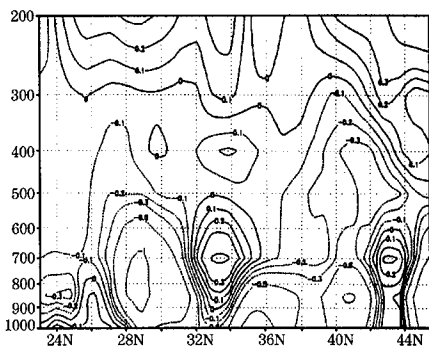
(b)9日 05时

图5 2002年6月8日23时、9日05时  
700hPa湿位涡图

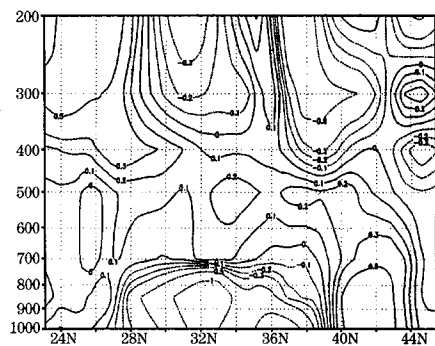
单位:PVU

从3张图的演变情况,可看出暴雨增幅前期对流层高层向低层位涡扰动的下传情况。08时的正位涡层位于300~200hPa,14时降至700~500hPa,17时正位涡扰动触地。08~17时是中尺度气旋形成发展时期,气旋发生的前期有孤立于高层位涡扰动而存在的低层正位涡扰动(图6a),在500hPa高空槽、700hPa低涡、地面气旋生成发展的时候,在槽前、低涡前及地面气旋的前方出现了从地面到200hPa的正位涡扰动柱,是气旋发生发展的重要标志,在南北两侧正位涡扰动柱夹

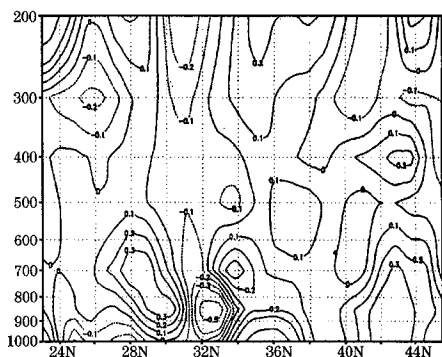
击中的负位涡扰动区有中尺度气旋的迅速发展(图6c),说明内陆地区暴雨过程中对流层上部或平流层的位涡扰动可以下传影响到对流层下部及地面的气旋发展。



(a)8日 08时



(b)8日 14时



(c)8日 17时

图6 2002年6月8日08时(a)、14时(b)、17时(c)  
沿108°E扰动湿位涡垂直剖面图

单位:PVU

4 结论

(1)2002年6月8~9日发生在青藏高

原东侧内陆陕西省的这次暴雨过程是在有利于陕西大降水的环流背景下发生的,高低空天气系统的配置符合陕西前汛期暴雨天气形势,这是大范围暴雨发生发展的必要条件。

(2)对流层中低层湿位涡的分布演变情况与此次暴雨有密切的对应关系:在暴雨增幅前期,暴雨区南侧对流层中低层一直维持较大湿位涡负值区,大降水出现在湿位涡正值区出现后。在暴雨增幅期,暴雨发生区南侧的湿位涡负值区会突然增强,中心抬升,同时雨区上空的正值湿位涡区域明显增大、强度增强。湿位涡正值的大小明显弱于湿位涡负中心的绝对值。暴雨发生在倾斜的湿位涡梯度最大处。此形势维持3~5小时,与大暴雨发生时间一致。当500hPa到地面湿位涡负值区消失时,降水结束。

(3)在此次暴雨过程中,700hPa湿位涡的分布演变对暴雨的发生发展有一定的指示意义。对应此次暴雨,700hPa低涡生成处为700hPa的湿位涡负值区,700hPa湿位涡正值区的分布与东路冷空气活动路径对应,在 $mpv$ 等值线相对密集的0线附近,正是冷暖空气交汇地带,也正是700hPa低涡切变线的位置所在。降雨强度随700hPa湿位涡正值

区中心值的减弱东移而相应变化。

(4)暴雨增幅期和增幅前期高层位涡扰动有很大变化,在暴雨增幅前期,对流层高层出现正位涡扰动,而在暴雨增幅期高层正位涡扰动明显减弱,正位涡扰动中心降至400hPa。在500hPa高空槽、700hPa低涡、地面气旋生成发展的时候,在槽前、低涡前及地面气旋的前方出现了从地面到100hPa的正位涡扰动柱。

### 参考文献

- 1 Hoskins, B. J. The role of potential vorticity in symmetric stability and instability. *Quart. J. R. Meteor. soc.*, 100: 480—482.
- 2 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): 275~283.
- 3 袁佳双. 1998年华南大暴雨冷空气活动的位涡场分析. *南京气象学院学报*, 2000, 24(1): 92~98.
- 4 蔡义勇. 台风暴雨相当位涡诊断分析. *气象学报*, 1992, 50(1): 118~125.
- 5 盛华. “81·7”大暴雨位涡与相当位涡的诊断分析. *高原气象*, 1984(3): 10~18.
- 6 卢焕珍. 渤海高压西侧中尺度低值系统发生发展及其与暴雨关系的诊断. *南京气象学院*, 2001.
- 7 刘子臣. 陕西暴雨特征的初步分析. *陕西气象*, 1983(3): 32~36.

## A Diagnostic Analysis of Heavy Rain Event in the East Side of Qinghai-Tibet Plateau

Wang Chuan

(Shaanxi Meteorological Observatory, Xi'an 710015)

Shou Shaowen

(Nanjing Meteorological Institute)

### Abstract

By using the routine sounding and surface observation data, the circulation features and physical causes for the heavy rain event occurred in the East Side of Qinghai-Tibet Plateau on 8—9 June, 2002 are diagnosed. Furthermore, based on MM4 model output, a mesoscale analysis is made according to moist potential vorticity. The results show that the spatial and temporal variations of moist potential vorticity can give good indication of the development of mesoscale cyclone and heavy rain. The heavy rain is located between the positive and negative moist potential vorticity zones in the lower troposphere, the rapid development of mesoscale cyclone is closely related with the spread downward of disorder moist potential vorticity in the higher troposphere.

**Key Words:** heavy rain moist potential vorticity diagnostic analysis