

青藏高原东侧突发性暴雨的湿位涡诊断分析

井 喜¹ 李明娟² 王淑云³ 胡春娟²

(1. 陕西榆林市气象局 719000; 2. 陕西省气象台; 3. 河北沧州市气象台)

提 要: 利用 MICAPS 系统提供的常规观测资料对 2004 年 6 月 29 日、2004 年 8 月 10 日发生在关中和陕北的突发性大暴雨进行湿位涡诊断分析。分析表明, 700 hPa 等压面上, $MPV_1 \leq -0.3$ PVU 中尺度对流不稳定区的生成、伴随对流不稳定区临近上游 $MPV_1 \geq 0.3$ PVU 中尺度对流稳定区的生成, 是形成突发性暴雨的湿正压场特征。伴随高原槽东移入河套(或关中), 槽后有 $MPV_2 < 0$ 湿斜压中心生成, 槽前有 $MPV_2 > 0$ 湿斜压中心生成, 正负湿斜压中心在暴雨区及其临近上游生成 MPV_2 等值线密集区, 形成了突发性暴雨的 700hPa 湿斜压场特征。暴雨区上空有深厚湿位涡负值层的形成, 伴随暴雨区上游对流层中低层有正湿位涡柱东移在暴雨区形成陡直的湿位涡等值线密集区, 对突发性暴雨的发生有指示意义。扰动湿位涡的三维空间结构及其演变也是青藏高原东侧突发性暴雨预报当中可利用的重要信息。

关键词: 青藏高原东侧 湿位涡 突发性暴雨 诊断分析

Diagnostic Analysis of Moist Potential Vorticity for Abrupt Rainstorm in Eastern Qinghai-Tibetan Plateau

Jing Xi¹ Li Mingjuan² Wang Shuyun³ Hu Chunjuan²

(1. Yulin Meteorological Office, Shaanxi Province 719000; 2. Shaanxi Meteorological Bureau;
3. Cangzhou Meteorological Office, Hebei Province)

Abstract: Using the observational data provided by MICAPS, the characteristics of the moist potential vorticity of two abrupt torrential rain events in Guanzhong, Shaanxi on June 29, 2004, and in northern Shaanxi on August 10, 2004 are analyzed. The results show that at 700 hPa level, the generation of a mesoscale convective instable area with $MPV_1 \leq -0.3$ PVU and a mesoscale convective stable area with $MPV_1 \geq 0.3$ PVU at the upper stream, is favorable for moist barotropic features, and contributes to the occurrence of abrupt torrential rains. The favorable moist baroclinic features develop at 700hPa level, while the plateau

trough moves eastwards to Hetao area or Guanzhong area. A moist baroclinic center with $MPV_2 < 0$ generates at the rear of the trough, as a moist baroclinic center with the $MPV_2 > 0$ is in front of the trough. The positive and negative moist baroclinic centers above rainfall location and its neighboring upper stream, form an isoline-concentrated zone of MPV_2 , which coupled with the mesoscale convective instable center with $MPV_1 \leq -0.3$ PVU accords to the rainfall location. On MPV_1 zonal cross-section chart, an MPV column, nearly through upper and low levels, builds up in west-tilting with height at neighboring upper stream of the rainfall location before the Guanzhong torrential rain. While at Ansai, a funnel-like positive MPV extends from upper level down to the lower troposphere, which overlaps the negative MPV area developing in the boundary layer. The deep negative MPV layer develops above the rainfall location. Simultaneously, at the mid-low level of troposphere, the positive MPV column moves eastwards to the rainfall location to form a steep isoline-concentrated zone of MPV , which holds indicative meaning to the occurrence of abrupt torrential rains. The MPV disturbance owns the characteristic of spreading from high to low latitudes. Its three-dimensional structure and evolution are the useful information in predicting abrupt torrential rain occurring in the eastern Tibetan Plateau.

Key Words: eastern Qinghai-Tibetan Plateau moist potential vorticity abrupt rainstorm diagnostic analysis

引 言

位涡是“位势涡度”的简称,是综合热力、动力的物理量,有湿位涡和干位涡,等熵位涡等形式。近年来位涡理论被广泛用于天气动力学研究,特别是中尺度暴雨、台风暴雨等研究中^[1-8],在暴雨形成的物理机制以及暴雨强度和落区方面得到了一些有意义的结论。然而,应用湿位涡作青藏高原东侧突发性暴雨的研究不多见。本文对 2004 年 6 月 29 日、2004 年 8 月 10 日发生在关中和陕北两次突发性大暴雨个例作湿位涡诊断分析,探讨湿位涡诊断在青藏高原东侧突发性暴雨预报中的应用前景。

1 雨情和灾情

2004 年 6 月 29 日下午,陕西关中突降暴雨,西安市周至县九峰乡 1 小时降水量达

到 197 mm,长安站 3 小时降水量达到 104 mm,局地还出现 8~12 级瞬时大风(以下简称关中暴雨)。由于暴雨来势猛,造成多处山体滑坡,大量民房进水,经济损失严重。

2004 年 8 月 10 日,陕北安塞县突降暴雨,24 小时降水量达到 126 mm,1 小时降水量达到 90 mm(以下简称安塞暴雨)。暴雨造成山洪爆发,房倒屋塌,淹没农田,冲毁公路,直接经济损失高达 856.3 万元。

2 资料和方法

本文选用由 MICAPS 系统提供的常规观测资料,利用北京大学物理学院大气科学系开发的客观分析诊断图形系统计算湿位涡,作湿位涡诊断分析。

等压面湿位涡的表达式:在 p 坐标下忽略 ω 的水平变化有:

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

$$g\left(\frac{\partial v}{\partial p}\frac{\partial \theta_{se}}{\partial x}-\frac{\partial u}{\partial p}\frac{\partial \theta_{se}}{\partial y}\right)$$

将其写成分量形式,有:

$$MPV_1 = -g(\zeta_p + f)\frac{\partial \theta_{se}}{\partial p},$$

$$MPV_2 = g\left(\frac{\partial v}{\partial p}\frac{\partial \theta_{se}}{\partial x}-\frac{\partial u}{\partial p}\frac{\partial \theta_{se}}{\partial y}\right)$$

其中 MPV_1 为湿正压项,表示惯性稳定性($\zeta_p + f$)和对流稳定性($-g\frac{\partial \theta_{se}}{\partial p}$)的作用,在北半球大气对流不稳定时, $MPV_1 < 0$;若大气对流稳定时, $MPV_1 > 0$ 。 MPV_2 为湿斜压项,包含了湿斜压性($\nabla_p \theta_{se}$)和水平风垂直切变的贡献。在湿位涡守恒的制约下, θ_{se} 面倾斜越大,气旋性涡度发展越剧烈^[9]。湿位涡的单位为 PVU, $1\text{PVU} = 10^{-6} \text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

3 环流形势和影响系统

3.1 关中暴雨

28 日 20 时(北京时,下同),对流层中上层我国 35°N 以南大部分地区为大陆高压控制,东亚为槽区,大陆高压和东亚大槽构成西高东低形势。亚洲对流层中上层西风带 $35^\circ \sim 50^\circ\text{N}$ 为两槽一脊形势,新疆、东亚为槽区,贝加尔湖至河套为脊区。28 日 20 时—29 日 20 时,随着对流层中上层西风带新疆槽和槽前西南急流的东移发展,西南急流右侧(陕西关中)反气旋环流得到增强;配合 850 hPa 来自江苏的东南气流、来自中南半岛槽前西南气流、来自新疆脊前西北气流在关中生成“人”字形切变,700 hPa 位于银川至兰州的低槽迅速东移到东黄河沿线至湖北十堰、和 850 hPa“人”字形切变线形成前倾配置,地面图上东西两路冷空气的活动对陕西关中暖湿空气形成夹挤抬升,陕西关中形成有利于中尺度突发性暴雨发生发展的环流背景。

3.2 安塞暴雨

2004 年 8 月 9 日 08 时,500 hPa、700 hPa 亚洲中纬度为两脊一槽形势,新疆为一脊区,副热带高压和华北高脊在 $110^\circ \sim 120^\circ\text{E}$ 形成同位相迭加,500 hPa 从酒泉至青海中部形成一槽区;700 hPa 银川、平凉、武都西侧形成一槽区,副热带高压西侧从云南、四川至平凉同时生成一支西南气流。9 日 20 时,随着 500 hPa 高原槽的东移,从兰州、银川至临河生成一支 $10 \sim 12 \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 西南气流,西南气流右侧(河套)反气旋辐散气流发展;700 hPa 河套西部槽北段东移入河套,延安生成 $8 \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 西南气流;地面图上,河套有倒槽发展,银川至兰州有冷锋东移。高低空影响系统的配合,加上地面冷锋北段的快速东移形成的触发作用,在安塞形成突发性大暴雨。

4 湿位涡分析

4.1 湿正压场与突发性暴雨的发展

关中暴雨发生期间,2004 年 6 月 29 日 20 时在 700 hPa 等压面上,河南、湖北交界地带生成 $MPV_1 \leq -0.6 \text{PVU}$ 对流不稳定中心,同时生成宽 100 km 左右、 $MPV_1 \leq -0.3 \text{PVU}$ 对流不稳定舌、由河南和湖北交界地带伸向西安市区;同时在平凉附近生成尺度在 300 km 左右、 $MPV \geq 0.3 \text{PVU}$ 对流稳定中心(图 1a),和西风带冷空气的活动形成对应;超低空 925 hPa 西安市区及其东南部也生成 $MPV_1 \leq -0.6 \text{PVU}$ 中尺度(200 ~ 300 km)对流不稳定中心(图略)。

安塞暴雨发生前,2004 年 8 月 9 日 20 时在 700 hPa 等压面上,延安西南气流左侧切变辐合区(安塞及其临近上游)生成尺度在 250 km 左右、 $MPV_1 \leq -0.6 \text{PVU}$ 对流不稳定中心;盐池至宁夏中卫同时生成尺度在 300 km 左右、 $MPV \geq 0.6 \text{PVU}$ 对流稳定中

心(图 1b),与西风带冷空气的活动形成对应;超低空 925 hPa 安塞和延安之间同时也生成 $MPV_1 \leq -2.0$ PVU、尺度在 100 km 左右对流不稳定中心(图略)。

暴雨区 925 hPa、700 hPa 中尺度对流不稳定中心的强烈发展,700 hPa 暴雨区临近上游中尺度对流稳定中心的强烈发展,成为两次突发性暴雨的共有特征。与文献[5]给出西北涡暴雨 700 hPa 湿正压场特征、暴雨落区相比,两者形成很大差异。

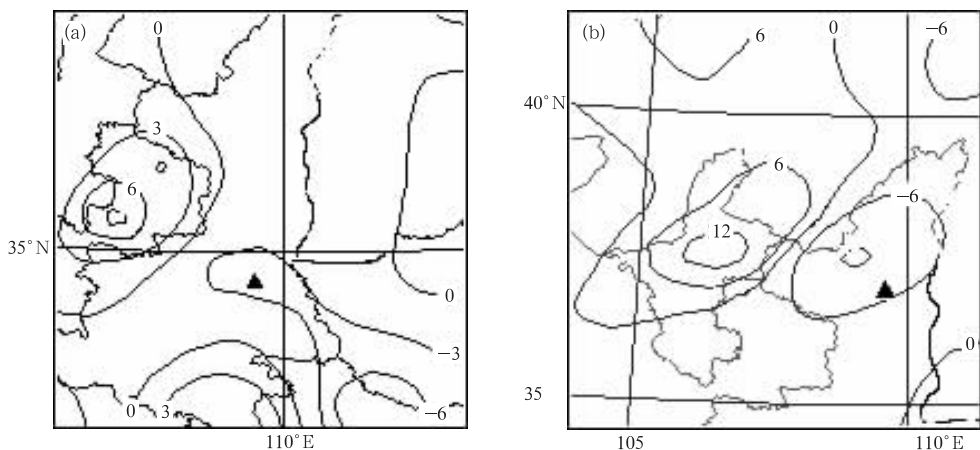


图 1 a. 2004 年 6 月 29 日 20 时 700hPa MPV_1 b. 2004 年 8 月 9 日 20 时 700hPa MPV_1

▲:暴雨区,下同;单位: 10^{-1} PVU,下同

4.2 湿斜压场与突发性暴雨的发展

4.2.1 关中暴雨

29 日 08 时,700 hPa 等压面上,关中西部生成一低槽,由于槽后偏北风产生的强冷平流使大气湿斜压性增强,从民勤到川北生成 $MPV_2 \leq 0$ 湿斜压高值带,从民勤到兰州生成 $MPV_2 \leq -2.4$ PVU 的湿斜压中心(图略)。29 日 20 时,伴随 700 hPa 关中西部槽的东移、槽后冷平流区东移、以及槽后偏北风增大,关中西部生成中尺度、 $MPV_2 \leq -0.4$ PVU 湿斜压中心区,平凉附近生成 $MPV_2 \leq -2.0$ PVU 湿斜压中心;关中西部槽的东移也伴随槽前西南气流和暖平流的发展,在河南和山西的交界地带生成 $MPV_2 \geq$

从关中暴雨和安塞暴雨 MPV_1 时空演变(图略)可见:暴雨发生时(或临近暴雨发生),暴雨区从 925~500 hPa 形成深厚的对流不稳定层,超低空 925 hPa 生成 $MPV_1 \leq -1.6$ PVU 强对流不稳定中心;400 hPa 对流层高层同时生成 $MPV_1 \geq 0$ 对流稳定层。这种 MPV_1 正负区叠置的形势有利于低层低涡系统的发展^[5];容易储存和释放不稳定能量,利于暴雨发生^[7]。

3.2 PVU 湿斜压中心;正负湿斜压中心之间形成冷暖平流的交汇地带,在湿斜压场表现为 MPV_2 等值线密集区(图 2a); MPV_2 等值线密集区和湿正压场中尺度强对流不稳定中心形成的耦合区,是突发性暴雨的发生发展区。这与文献[5]表述的湿斜压场和暴雨落区不同,而与文献[2]表述的湿斜压场和暴雨落区相似。

29 日 20 时,700 hPa 等压面上暴雨区 $MPV_2 > 0$,配合 850~500 hPa 之间 $\frac{\partial \theta_{se}}{\partial p} > 0$,700 hPa 暴雨区形成有利于中尺度气旋快速且显著发展的条件^[9];850 hPa 等压面上暴雨区 $MPV_2 > 0$,配合 925~700 hPa 之间 $\frac{\partial \theta_{se}}{\partial p}$

>0 , 850hPa 暴雨区也形成有利于中尺度气旋快速且显著发展的条件^[9]。

4.2.2 安塞暴雨

9日08时, 700 hPa 等压面上, 和高原西风带低槽后由偏北风产生的冷平流相对应, 从民勤、格尔木至西藏东部生成 $MPV_2 \leq 0$ 湿斜压高值带, 民勤以北生成 $MPV_2 \leq -2.0$ PVU 的湿斜压中心(图略)。9日20时, 伴随高原西风带低槽北段移入河套, 槽后西北风和东北风产生的冷平流使大气湿斜压增强, 从河套北部、银川至格尔木生成 $MPV_2 \leq 0$ 湿斜压高值带和 $MPV_2 \leq -2.0$ PVU 的湿斜压中心; 西风带低槽北段移入河套也伴随槽前西南气流和暖平流的发展, 大气湿斜压性增强, 陕西中部、山西和河南交界地带生成 $MPV_2 \geq 2.8$ PVU 湿斜压中心区; 正负湿

斜压中心之间形成冷暖平流的交汇地带, 在湿斜压场表现为 MPV_2 等值线密集区(图2b); MPV_2 等值线密集区和湿正压场中尺度强对流不稳定中心形成的耦合区, 是突发性暴雨的发生发展区。这也与文献[5]表述的湿斜压场和暴雨落区不同, 而与文献[2]表述的湿斜压场和暴雨落区相似。

9日20时, 700hPa 等压面上暴雨区 $MPV_2 > 0$, 配合 850~500hPa 之间 $\frac{\partial \theta_{sc}}{\partial p} > 0$, 700hPa 暴雨区形成有利于中尺度气旋快速且显著发展的条件^[9]; 850hPa 等压面上暴雨区 $MPV_2 > 0$, 配合 925~700hPa 之间 $\frac{\partial \theta_{sc}}{\partial p} > 0$, 850hPa 暴雨区也形成有利于中尺度气旋快速且显著发展的条件^[9]。

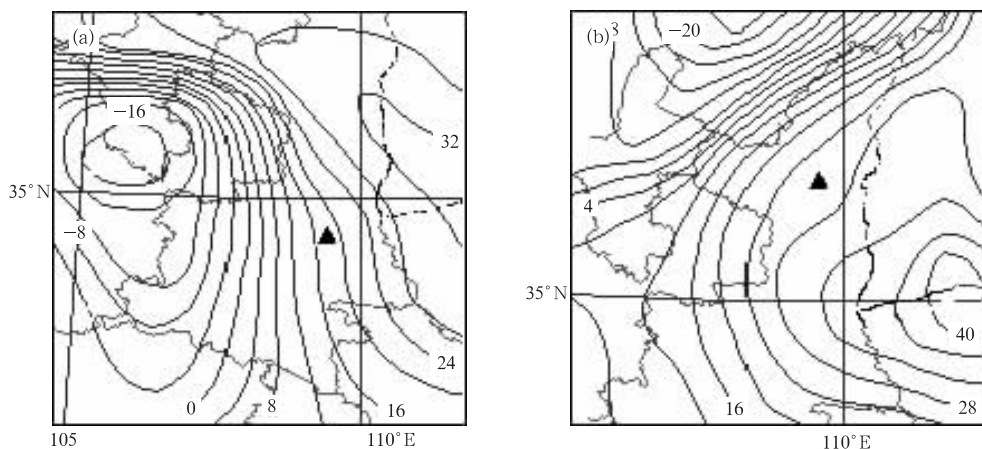


图2 a. 2004年6月29日20时700hPa MPV_2 b. 2004年8月9日20时700hPa MPV_2

4.3 湿位涡三维空间结构与突发性暴雨的发展

4.3.1 关中暴雨

对关中暴雨区(34°N)做湿位涡纬向垂直剖面图。从图3可见, 暴雨发生前(29日08时), 和对流层中低层高原槽耦合、在暴雨区(109°E)上游对流层中低层生成一湿位涡

高值区, 湿位涡高值区并呈“漏斗状”、随高度降低向东倾斜伸向对流层低层, 有利于暴雨区上游对流层低层气旋性涡度的发展^[10]; 从 $105^\circ\sim 125^\circ\text{E}$ 近地层由于夜间辐射冷却或锋前阵雨生成一湿位涡高值层; 由于高原槽前后冷暖平流的相互作用, 同时在暴雨区上游对流层中低层形成一近于垂直的湿位涡等值线密集区; 暴雨区上空对流层中低层形成一

深厚的湿位涡负值层。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,暴雨区上空对流层中低层已形成深厚的不稳定的暖湿气流。29 日 20 时,由于暴雨区以及东部边界层西南或东南气流的发展,湿位涡负值层向边界层发展,暴雨区对流层低层形成陡直的湿位涡等值线密集区;伴随高原槽的东移,暴雨区上游对流层中低层正湿位涡高值区东移,并向对流层低层发展,

和边界层正湿位涡高值区打通,暴雨区对流层中层同时形成垂直的湿位涡等值线密集区。这一过程对应着关中突发性暴雨的发生发展。30 日 08 时,随着对流层中低层正湿位涡区东移减弱,关中突发性暴雨结束。

4.3.2 安塞暴雨

对安塞暴雨区(37°N)做湿位涡纬向垂直剖面图。从图4可见,暴雨发生前(9 日 08 时),暴雨区(109°E)及其上下游边界层湿

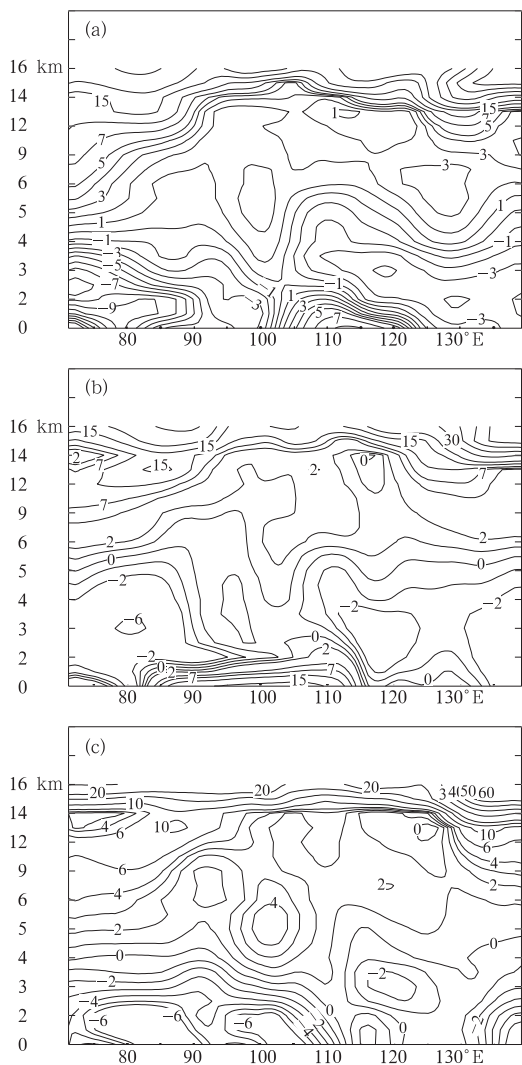


图 3 a. 2004 年 6 月 29 日 08 时 MPV 剖面图;
b. 2004 年 6 月 29 日 20 时 MPV 剖面图;
c. 2004 年 6 月 30 日 08 时 MPV 剖面图

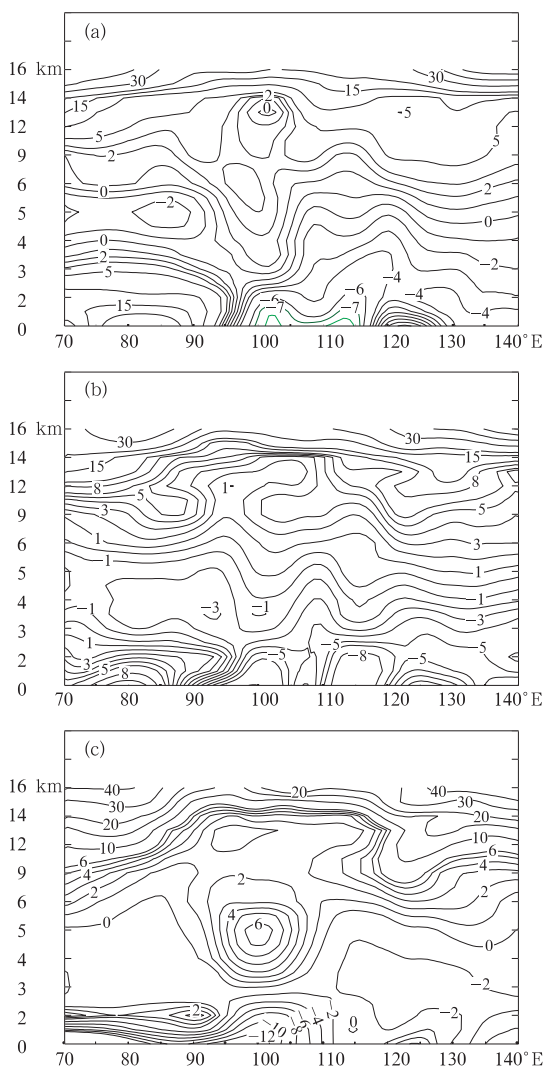


图 4 a. 2004 年 8 月 9 日 08 时 MPV 剖面图;
b. 2004 年 8 月 9 日 20 时 MPV 剖面图;
c. 2004 年 8 月 10 日 08 时 MPV 剖面图

位涡负值强烈发展,生成 $MPV \leq -0.6$ PVU 湿位涡区,湿位涡负值区并向上发展至对流层中层,根据 Hoskins 位涡理论,暴雨区已形成深厚的不稳定暖湿气流;暴雨区上游从对流层高层有湿位涡正值区向对流层低层伸展,和暴雨区上游生成的湿位涡负值中心区形成垂直叠置,有利于暴雨区上游对流层低层气旋性涡度的发展^[10];正负湿位涡区之间在暴雨区上游对流层中低层形成陡直的湿位涡等值线密集区。从 9 日 20 时—10 日 08 时,伴随对流层中低层正湿位涡的东移和发展、边界层负湿位涡的发展,暴雨区上空形成陡直的湿位涡等值线密集区,这一过程对应安塞突发性暴雨的发生发展。

通过上述分析发现,暴雨区深厚湿位涡负值层的形成,暴雨区上游有正湿位涡柱东移、在暴雨区形成陡直的湿位涡等值线密集区,是两次突发性暴雨的共有的特征。安塞暴雨湿位涡空间结构及其演变类似于文献[5],而关中暴雨湿位涡空间结构及其演变属于另一类型。

4.4 扰动湿位涡与突发性暴雨的发展

我们把关中暴雨湿位涡瞬时值 MPV 与 28 日 20 时—30 日 08 时湿位涡平均值 (\overline{MPV}) 的差值定义为关中暴雨湿位涡扰动量 $(MPV)'$, 即 $(MPV)' = MPV - \overline{MPV}$; 我们把安塞暴雨湿位涡瞬时值 MPV 与 8 日 20 时—10 日 08 时湿位涡平均值 (\overline{MPV}) 的差值定义为安塞暴雨湿位涡扰动量 $(MPV)'$, 即 $(MPV)' = MPV - \overline{MPV}$ 。

对关中暴雨区 (109°E) 做关中暴雨湿位涡平均值和湿位涡扰动量的经向垂直剖面图 (图略)。关中暴雨湿位涡背景场: 暴雨区 30°N 以南 500hPa 以下对流层低层形成深厚的 MPV 负值层, 即形成深厚的不稳定暖湿气流层; 暴雨区 40°N 以北 850~700hPa 也形成 MPV 负值层, 500hPa 以上对流层高层

为 MPV 正值层; 暴雨区北方 700~500hPa 形成和 700hPa 北方锋区耦合的 MPV 正值层。突发性暴雨的发生对应: 28 日 20 时、29 日 08 时, 暴雨区 500hPa 以下对流层低层 MPV 负值扰动两次获得发展, 即不稳定暖湿气流两次获得向北发展; 29 日 08 时, 暴雨区北方 925~850hPa 出现 MPV 负值扰动向南发展逼近暴雨区, 暴雨区北方 700~600hPa 同时出现 MPV 正值扰动向南发展逼近暴雨区, 对应暴雨区北方 700hPa 和高原槽相伴的锋生区东移南压逼近暴雨区。

对安塞暴雨区 (109°E) 做安塞暴雨湿位涡平均值和湿位涡扰动量的经向垂直剖面图 (图略)。安塞暴雨湿位涡背景场: 暴雨区 500 hPa 以下对流层低层形成宽广且深厚的 MPV 负值层, 即形成深厚且宽广不稳定暖湿气流层; 暴雨区 500hPa 以上对流层高层为 MPV 正值层。突发性暴雨的发生对应: 9 日 08 时、9 日 20 时, 暴雨区从 850~400hPa 出现深厚的 MPV 负值扰动, 即不稳定暖湿气流两次获得发展; 9 日 20 时, 暴雨区北方 925~700hPa 出现 MPV 负值扰动向南发展逼近暴雨区, 暴雨区北方 600~400hPa 同时出现 MPV 正值扰动向南发展逼近暴雨区, 对应 700hPa 和高原槽相伴的锋生区东移进入河套北部。

5 结 论

(1) 700hPa 等压面上 $MPV_1 \leq -0.3$ PVU、中尺度 (100~300km) 对流不稳定区的生成、伴随对流不稳定区临近上游 $MPV_1 \geq 0.3$ PVU、中尺度 (300km 左右) 对流稳定区的生成, 形成有利于突发性暴雨发生的湿正压场特征。有利于突发性暴雨发生的 700hPa 湿斜压场特征为: 伴随高原槽东移入河套 (或关中), 槽后有 $MPV_2 < 0$ 湿斜压中心生成, 槽前有 $MPV_2 > 0$ 湿斜压中心生成, 正负湿

斜压中心在暴雨区及其临近上游生成 MPV_2 等值线密集区。 MPV_2 等值线密集区和 $MPV_1 \leq -0.3PVU$ 中尺度对流不稳定中心形成的耦合区,对应暴雨落区。湿正压场和湿斜压场的配合,同时在暴雨区对流层低层形成有利于中尺度气旋快速且显著发展的条件。

(2) 在湿位涡纬向剖面图上:关中暴雨发生前,暴雨区临近上游生成随高度向西倾斜、高低层正湿位涡区将要打通的湿位涡柱;安塞暴雨发生前,暴雨区临近上游对流层中高层有正湿位涡呈倾斜的漏斗状伸向对流层低层、和边界层发展的湿位涡负值区形成垂直叠置。暴雨区上空对流层中低层有深厚湿位涡负值层形成、伴随暴雨区上游对流层中低层有正湿位涡柱东移、在暴雨区形成陡直的湿位涡等值线密集区,对突发性暴雨的发生发展有指示意义。

(3) 扰动湿位涡分析表明,暴雨发生前,暴雨区上空出现深厚的 MPV 负值扰动。暴雨的发生对应:暴雨区北方 925~700hPa 有 MPV 负值扰动生成且逼近暴雨区,暴雨区北方 700~400hPa 同时有 MPV 正值扰动生成且逼近暴雨区。扰动湿位涡的三维空间结

构及其演变也是青藏高原东侧突发性暴雨预报当中可利用的重要信息。

参考文献

- [1] Hoskins, B. J. The role of potential vorticity in symmetric stability and in stability[J]. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 100:480-482.
- [2] 井喜,贺文彬,毕旭,等. 远离台风影响陕北突发性暴雨成因分析[J]. 应用气象学报, 2005, 16(5): 655-662.
- [3] 王川,寿绍文. 一次青藏高原东侧大暴雨过程的诊断分析[J]. 气象, 2003, 29(7): 7-12.
- [4] 尤红,曹中和. 2004 年云南秋季强降水位涡诊断分析[J]. 气象, 2006, 32(7): 95-101.
- [5] 王丛梅,丁治英,张金艳. 西北暴雨的湿位涡诊断分析[J]. 气象, 2005, 31(11): 28-33.
- [6] 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[J]. 高原气象, 2000, 19(1): 111-119.
- [7] 范可,琚建华,范学峰. 湿位涡诊断分析在东南亚强降水中的应用[J]. 气象科技, 2003, 31(1): 23-28.
- [8] 王建中,丁一汇. 位涡在暴雨成因中分析中的应用[J]. 应用气象学报, 1996, 7(1): 19-27.
- [9] 吴国雄,蔡雅萍,唐晓菁. 湿位涡和倾斜涡度发展[J]. 气象学报, 1995, 53(4): 387-404.
- [10] 寿绍文,励申申,姚秀萍. 中尺度气象学[M]. 北京:气象出版社, 2003: 278-284.