

# 陕西中南部一次突发性大暴雨过程分析

郭大梅<sup>1</sup> 许新田<sup>1</sup> 刘 勇<sup>1</sup> 张小玲<sup>2</sup> 刘瑞芳<sup>1</sup>

(1. 陕西省气象台, 西安 710014; 2. 国家气象中心)

**提 要:** 利用常规观测资料、陕西地面加密观测资料、FY2-2C 卫星 TBB 资料, 对 2007 年 8 月 8—9 日陕西中南部突发性大暴雨过程进行了诊断分析。结果表明: 500hPa 中尺度切变线、700hPa 低涡是这次暴雨的主要影响系统, MCC 是造成此次暴雨的直接原因。暴雨的发生发展与湿位涡的时空演变有很好的对应关系, 湿位涡“正负区叠加”的配置是暴雨发展的有利形势。暴雨区发生在 700hPa 湿位涡正压项的零线附近及负值区等值线密集区中, 700hPa 低涡东侧的强辐合区与 200hPa 西北风高空急流右侧的强辐散区叠置, 为暴雨区提供了持续强劲的上升运动。

**关键词:** 暴雨 高空急流 湿位涡 MCC

## Analysis on Process of an Abrupt Rainstorm in Central and Southern Shaanxi

Guo Damei<sup>1</sup> Xu Xintian<sup>1</sup> Liu Yong<sup>1</sup> Zhang Xiaoling<sup>2</sup> Liu Ruifang<sup>1</sup>

(1. Shaanxi Meteorological Observatory, Xi'an 710014; 2. National Meteorological Center)

**Abstract:** An analysis on the heavy rain in central and southern Shaanxi from 8 to 9 August 2007 is performed with the routine-observational data provided by MICAPS, surface data of intensive observation, FY-2C satellite TBB. The results indicate that the mesoscale shear line on 500hPa and the low vortex on 700hPa are its mainly influencing systems, and it is directly caused by MCC. The spatial and temporal variations of moist potential vorticity can give good indication for the development of heavy rain. Superimposition of the positive and negative moist potential vorticity is advantageous to the development of the rainstorm. The heavy rain is located near the zero line of positive potential vorticity and intensive belt of negative MPV1 on 700hPa. The strong convergence in the east side of low vortex on 700hPa and strong divergence in the right side of high altitude jet stream at 200hPa supply strong and continuous ascending movement.

**Key Words:** heavy rain high altitude jet stream moist potential vorticity MCC

本文由国家自然科学基金干旱背景下黄河流域致洪暴雨的多尺度天气学模型研究(项目编号:40505010)资助

收稿日期: 2008 年 2 月 27 日; 修定稿日期: 2008 年 5 月 20 日

## 引言

暴雨一直是气象工作者关注的对象之一,对此气象工作者进行了大量的研究,取得许多新成果和观测事实。吴国雄等<sup>[1]</sup>对江淮流域暴雨过程的湿位涡分析表明湿位涡是暴雨诊断和预报的有利工具。熊秋芬等<sup>[2]</sup>对长江流域梅雨锋上的一次大暴雨进行了分析表明,梅雨锋暴雨是在有利的高、中不同纬度带环流相互作用的结果。杨宏青等<sup>[3]</sup>研究了长江流域面雨量的变化趋势,结果表明长江流域年和夏季6—8月的暴雨日数和暴雨量表现为较大范围的增加趋势。赵玉春等<sup>[4]</sup>初步分析了南半球冷空气爆发在华南地区连续性暴雨形成中的作用。刘国忠等<sup>[5]</sup>对影响华南地区西南低涡及致洪低涡活动进行了统计研究。青藏高原东北侧也时常有暴雨发生,暴雨给当地人们生命财产造成重大损失,对青藏高原东北侧的暴雨发生、发展的规律和机理认识仍有许多未解因素,加强对青藏高原东北侧的暴雨研究非常重要。

2007年8月8—9日,青藏高原东北侧的甘肃东南部、陕西中南部出现突发性暴雨、大暴雨。其中陕西共出现32站暴雨,陕西中部8站大暴雨,礼泉、乾县、泾阳、兴平、咸阳、高陵等站日降水量为1961年以来的最大值,礼泉日降水达215mm,降水主要集中在8日20:00至9日01:00(北京时,下同)。暴雨引发洪涝、滑坡、泥石流等自然灾害及人员伤亡,直接经济损失8.29亿元。本文利用利用MICAPS系统提供的常规观测资料、陕西省地面加密观测、以及FY2-2C卫星TBB资料,采用湿位涡诊断分析方法,对这次暴雨过程进行分析,试图找出此类天气的形成机理及湿位涡场的特征与强降水的关系,为今后的暴雨天气提供有益的预报思路。

## 1 天气形势分析

图1给出2008年8月8日20时至9日20时降水量,此过程是在有利的环流背景下发生的。2007年8月8日08时,500hPa天气图上,欧亚中高纬度为一槽一脊型,西西伯利亚到巴尔喀什湖为一深厚的低涡,俄罗斯远东到我国东北为一高压脊,40°N以南我国大部地区为584dgpm线带状高压控制,高空锋区维持在40°N左右。西太平洋副热带高压588dgpm线的西脊点位于32°N、117°E。从风场的变化中发现青海东部—甘肃中部—宁夏有一中 $\alpha$ 尺度切变线,陕西中南部地区处在中尺度切变线前部的西南气流控制中。与500hPa中尺度切变线相对应区域700hPa形成了低涡,700hPa四川至陕西上空为西南风,风速 $1\sim 2\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。陕西位于低涡前的偏南风中,暴雨发生前,低层没有出现低空急流,暴雨必须的水汽输送条件较弱。

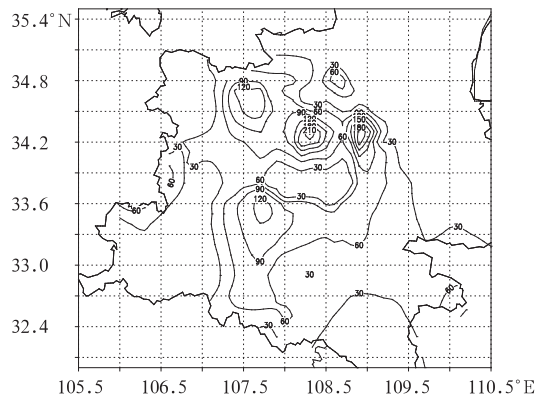


图1 2007年8月8日20时至9日20时降水量  
单位:mm

8日20时500hPa形势场(图2)欧亚中高纬度环流形势无明显变化,但西太平洋副热带高压经历一个由弱变强的过程。588dgpm线的西脊点西伸到32°N、108°E。中 $\alpha$ 尺度切变线移至陇东南地区,辐合线的南北两侧为西北风和西南风,温差较小,约2

~3℃,冷空气比较弱。这股弱冷空气通过切变线源源不断地向东输送,是陕西中南部强降水天气的直接影响系统。同时,位于广东沿海附近的台风帕布由南向北移动。700hPa 图上台风北侧的偏东风一直延伸到陕西中南部,前面提到的 700hPa 低涡中心缓慢东移至 500hPa 陇东南中  $\alpha$  尺度切变线区域,低涡的东侧有两股气流,一股是来自台风帕布外围的东海南海偏东气流,偏东风风速为  $12\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ;一股是来自孟加拉湾的偏南气流,风速增大到  $6\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,为陕西中南部带来充沛的水汽。由于副高的西伸,台风帕布的北移,使得中高纬度系统稳定,高原低值系统移动缓慢,对大暴雨的形成十分有利。可见,500hPa 中  $\alpha$  尺度切变线和 700hPa 低涡是陕西中南部大暴雨主要影响系统。

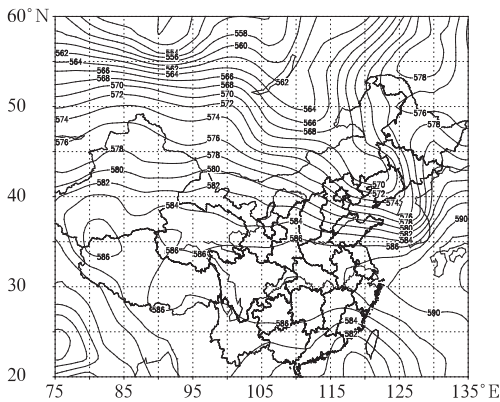


图 2 2007 年 8 月 8 日 08 时 500hPa 位势高度场  
单位:dgpm

## 2 云图特征

MCC 是造成严重气象灾害的主要天气系统之一,已受到越来越多的气象工作者的关注、探讨和研究<sup>[6-7]</sup>,但目前对我国西部的 MCC 的研究还较少。本文利用每小时一次的 FY-2C 卫星云图资料,对影响 2007 年 8 月 8—9 日陕西中南部大暴雨的 MCC 进行了初步分析。取  $TBB \leq -32^\circ\text{C}$  云团为 MCS,满足  $-32^\circ\text{C}$  以下云罩面积在  $10 \times$

$10^4\text{km}^2$  以上,且  $-53^\circ\text{C}$  以下云罩面积在  $5 \times 10^4\text{km}^2$  以上,维持达 6 小时以上的暴雨云团为 MCC<sup>[8-9]</sup>。

8 日 17 时红外云图上,高原东部有一条对流云带,呈东北西南走向,陕西南部—四川北部有对流云生成,尺度较小。8 日 20 时,天气图上 500hPa 的陇东南中尺度辐合线东侧,即 700hPa 低涡的东侧辐合区有两个中尺度对流云团 A、B 生成,云团 A 水平尺度约 100km,呈圆状,云顶亮温(最低或整个云团,下同)  $TBB = -70^\circ\text{C}$ ,云团 B 水平尺度约 120km,椭圆状,云顶亮温  $TBB = -60^\circ\text{C}$ 。A 云团和 B 云团是 MCC 形成的初期。强降水发生在云顶亮温  $TBB$  低值中心及  $TBB$  等值线的密集区域,其中岐山 1 小时降水达 66mm,凤翔 1 小时达 45mm。8 日 21 时(图 3a),A 云团迅速发展略有东移,冷云面积大幅度增加,  $TBB \leq -32^\circ\text{C}$  云罩面积约  $4 \times 10^4\text{km}^2$ ,  $TBB \leq -53^\circ\text{C}$  以下云罩面积约在  $2 \times 10^4\text{km}^2$ 。而 B 云团冷云面积及  $TBB$  变化不大。随后, A 云团继续发展东移。8 日 23 时(图 3b),随着 500hPa 的中尺度切变线、700hPa 低涡缓慢东移,副热带高压西伸,台风北侧的偏东气流向 700hPa 低涡的东北侧暴雨区输送了大量的水汽和不稳定能量,同时 B 云团东移并入 A 云团,云顶亮温  $TBB \leq -53^\circ\text{C}$  的云罩面积约  $8 \times 10^4\text{km}^2$ ,  $TBB \leq -32^\circ\text{C}$  云罩面积约  $12 \times 10^4\text{km}^2$ ,发展为 MCC,对流发展旺盛。9 日 00 时(图 3c),冷云面积扩展到最大, MCC 发展到最强,几乎占据陕西中南部地区,此时对流发展最为旺盛。强降水在云顶亮温  $TBB$  低值中心,高陵 1 小时降水 92mm,西安 1 小时降水 31mm。9 日 02 时(图 3d),随着副热带高压的缓慢东退,台风登陆并逐渐减弱,暴雨区的水汽输送减弱, MCC 也开始减弱东移,冷云面积变化不大,但云顶亮温  $TBB$  低值中心由  $-70^\circ\text{C}$  升到  $-60^\circ\text{C}$ ,说明对流开始减弱。9

日 03 时, MCC 已移到陕西东南—河南西部一带, 云顶亮温  $TBB$  低值中心仍造成镇安一小时降水 33mm。9 日 04 时, MCC 继续东移分裂成 2 对流云团, 在陕西东南部开始消亡, 陕西的强降水也随着减弱。具体地说: MCC 经历了发展、成熟、消亡三个阶段,

$TBB$  在发展旺盛期达  $-70^{\circ}\text{C}$ , 其生命史约 6 小时, 暴雨是在 MCC 形成发展的过程中产生的, 强降水出现在云顶亮温  $TBB$  的低值中心及  $TBB$  等值线的密集区中, 最强降水出现在 MCC 的成熟期。

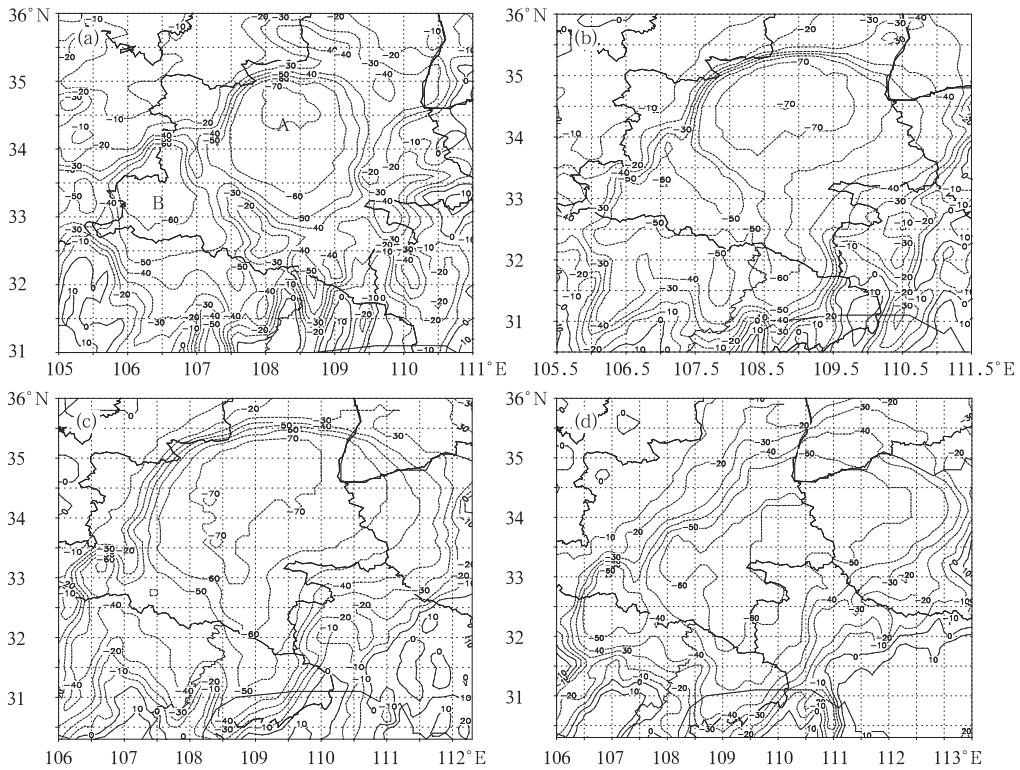


图 3 2007 年 8 月 8—9 日  $TBB$  图(单位:  $^{\circ}\text{C}$ )  
(a) 8 日 21 时 (b) 8 日 23 时 (c) 9 日 00 时 (d) 9 日 02 时

分析可见, MCC 是在 500hPa 的中尺度切变线、700hPa 低涡东侧形成的, 台风北侧的偏东气流及来自孟加拉湾的偏南气流不断向 700hPa 低涡的东侧输送热量、水汽, 从后面的第三部分可知此处是高不稳定能量区和强辐合上升区, 有利于 MCC 产生和维持, MCC 是造成该区域大暴雨的直接原因。

### 3 形成机制分析

#### 3.1 能量分析

从 850hPa  $\theta_{se}$  场可以看到(图略), 8 日 20

时, 四川—陕西中部有一高能区, 高能线呈西南—东北走向, 从山西有一低能区伸向陕西中部, 能量场特征呈  $\Omega$  型, 陕西中南部位于高能右侧能量锋区中,  $\theta_{se}$  的值为 353~361K, 由西南向东北伸的高能区反映的是一股高能、不稳定的暖湿气流。从  $\theta_{se}$  的演变得知: 该高能区是低层台风北侧的偏东气流向北推进形成的, 它向暴雨区输送了大量的水汽和不稳定能量。 $\Omega$  系统西侧的低能区表明低层有西北路干冷空气, 西北路干冷空气与高能锋区的暖湿气流交汇, 使得高能锋区附近出

现强降水。

暴雨期间,高层西北风引导干冷空气与低层台风北侧的偏东暖湿气流在高原东北侧地区形成了上干下湿的不稳定结构。陕西中南部处于大面积的不稳定区域, $\Delta\theta_{\text{set}(500-850)} < -5^\circ\text{C}$ ,不稳定能量的积聚和释放酿成了陕西中南部的区域性大暴雨。

### 3.2 700hPa 低涡和西北风高空急流的作用

这次过程受到 200hPa 高空急流、700hPa 低涡共同影响,大暴雨的时空分布具有明显的中尺度特征,因此分析高空急流、低涡对暴雨的作用尤为重要。

8日20时200hPa图上(图4),高空急流为西北风,急流中心位于新疆—内蒙古—陕西、山西的北部一线,中心值达 $52\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,高空急流轴呈西北—东南走向,急流尺度几千公里。研究表明<sup>[10-11]</sup>高空急流轴向西北—东南方向的倾斜可以形成其出口处右侧的强辐散形势,从而诱使低层低值系统、低空急流以及暴雨的发生发展,即倾斜的急流轴更有利于暴雨的发生。700hPa低涡位于陇东南至陕西西部,水平尺度约400km,陕西中南部地区位于急流轴出口区的右侧,反气旋环流中。200hPa散度图表明,西北风高空急流出口区的右侧(陇东南—陕西中南部地区)为辐

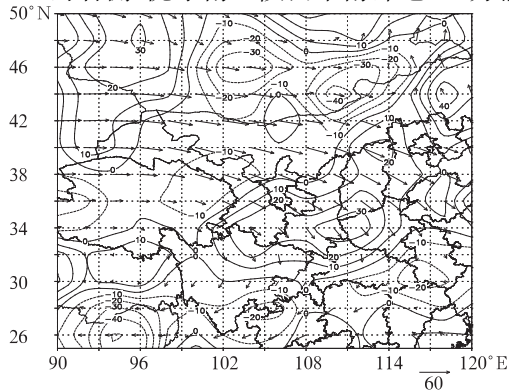


图4 2007年8月8日20时200hPa风场及散度场(箭头为风矢,单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ; 线条为散度场,单位: $10^{-6}\text{s}^{-1}$ )

散区(图4),散度中心值为 $3\times 10^{-5}\text{s}^{-1}$ ,这一区域有利于对流的发生发展;700hPa低涡(陇东南—陕西西部地区)为强辐合区,散度中心值为 $-3\times 10^{-5}\text{s}^{-1}$ ,陕西中南部位于陇南涡的前部,暴雨强中心区域正好位于西北风高空急流出口区的右侧和低层低涡的前部,当700hPa低涡东侧辐合区与高空辐散区叠置时,上升运动得以发展。

沿 $107^\circ\text{E}$ 垂直速度剖面图表明, $33\sim 36^\circ\text{E}$ 之间为上升气流区,最大上升速度位于400hPa附近,达到 $-4.5\times 10^{-3}\text{hPa}\cdot\text{s}^{-1}$ ,上升运动发展到整个对流层。此外200hPa西北风高空急流为暴雨区带来干冷空气,与低层暖湿气流之间形成强烈位势不稳定,有利于强对流的发展。

### 3.3 湿位涡正压项分布特征

由于湿正压项 $MPV1$ 比湿斜压项 $MPV2$ 要大,所以湿位涡 $MPV$ 的大小主要由湿正压项 $MPV1$ 决定。

在700hPa湿位涡正压项的水平分布图(图5)上,8日08时(暴雨发生前),陇东南至陕西地区均处于 $MPV1$ 负值区中,陇东南 $MPV1$ 负值量值较小,为 $-0.4\sim -2.4\text{PVU}$ ,中心最大值位于陕北,为 $-4.0\text{PVU}$ , $\frac{\partial\theta_{*}}{\partial p} > 0$ ,说明陕西地区大气处于对流不稳定状态,正位涡大值中心位于宁夏北部—蒙古南部,此时冷空气也位于宁夏北部—蒙古南部一带,与湿位涡的大值相对应,冷空气距陕西比较远,虽然陕西地区大气处于不稳定状态,但因为没有冷空气触发对流,没有产生降水天气。8日20时(暴雨发生时,图5a),700hPa上 $MPV1$ 的负值中心在四川东南部,中心值为 $-4\text{PVU}$ ,陇东南至陕西中南部地区处于 $MPV1$ 零线附近及负值区等值线密集区,量值中心值增大到 $-3.5\text{PVU}$ ,广东沿海附近的台风帕布由南向北移动,台风北侧的偏东气流输送热量水汽、来自孟加拉湾的偏南气流也带来大量的水汽、热量,使得陕



西中南部大气处于强烈对流不稳定状态。同时陕西中南部—陇南的西北侧、东北侧为冷空气,与  $MPV1$  正值区相对应。在  $MPV1$  等值线相对密集的零线附近,正是冷暖空气交汇的地带,有利于水汽辐合、垂直涡度剧烈发展,暴雨就发生在湿位涡的零线附近冷暖空气交汇区及负值区等值线密集暖区中。随着暴雨的产生,不稳定能量逐渐释放,副热带高压东退,台风减弱,700hPa 低涡的偏东气流被阻断,陕西中南部上空的  $MPV1$  负值逐渐减小。9 日 08 时,陕西中南部大部地区仍为  $MPV1$  的负值区控制,但强度明显减弱,  $MPV1$  在  $-0.4 \sim -1.6$ PUV, 强降水基本结束,转为一般性降水天气。分析这次暴

雨过程中 700hPa  $MPV1$  的演变可以发现,  $MPV1$  高值与对流稳定的冷空气相联系,较小的  $MPV1$  正值或负值区域和对流不稳定或对流稳定程度低的暖湿空气相联系,零线及附近等值线密集区是冷暖气流相互作用的区域,暴雨区发生在湿位涡的零线冷暖空气交汇区及负值区等值线密集暖区中。

从沿暴雨区  $108^{\circ}E$   $MPV1$  的纬向剖面图中看到,湿位涡最大值集中在 300hPa 以上,暴雨发生前,8 日 08 时,从平流层向下有一高位涡区伸展,高位涡舌 ( $>0.2$ PUV) 的范围伸展到 550hPa 附近,位于暴雨区的北侧。表明对流层高层为对流稳定区,在 600hPa 以下对应为负值区,为对流不稳定区。暴雨开始时,8 日 20 时(图 5b),暴雨区 ( $33 \sim 36^{\circ}N$ )湿位涡的零线在 700hPa 附近,在 700hPa 以下对应为负值区,为对流不稳定区。高层高位涡区向南倾斜下伸到暴雨区的 700hPa,对流不稳定高度降低,不稳定能量开始释放。这说明暴雨区上空北侧 200hPa 西北风带来的干冷空气以高位位涡柱的形式向下入侵,对流层高层的大值位涡下传,使具有高空位涡的冷空气叠加在低层扰动所对应的负位涡中心之上,对于位势不稳定能量释放十分有利。而在大值位涡北侧分离出的小值的正位涡舌延伸至对流层的中低层,在  $33 \sim 36^{\circ}N$  附近上空与低层的扰动叠加,根据倾斜位涡发展理论<sup>[12]</sup>,当具有高湿位涡的冷空气沿等熵面下滑时,将要经过稳定性逐渐减弱的环境大气,导致其绝对涡度增大,此时垂直涡度将显著增长,导致上升运动加强和水汽的向上输送,有利于降水加强。因此高层湿位涡侵入下伸暴雨区,对暴雨起到增幅的作用。

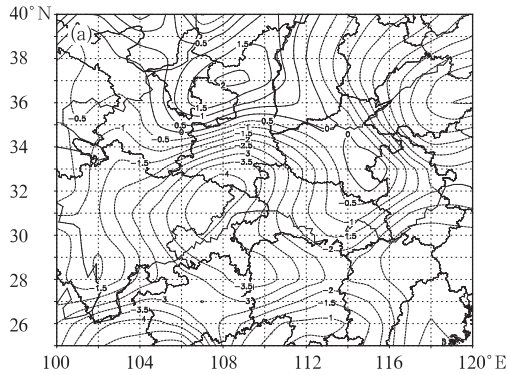


图 5a 2007 年 8 月 8 日 20 时 700hPa 湿正压位涡图  
单位:  $10^{-1}$  PUV

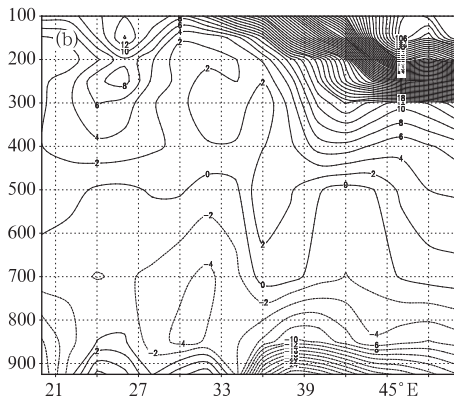


图 5b 2007 年 8 月 8 日 20 时沿  $108^{\circ}E$  湿正压位涡图  
单位:  $10^{-1}$  PUV

#### 4 结 论

- (1) 500hPa 中尺度切变线、700hPa 低涡

是这次暴雨的主要影响系统。副高的西伸、台风帕布北上,使得中高纬形势稳定,造成高原东侧暴雨系统移速减慢,有利于形成大暴雨。

(2) MCC 是在 500hPa 的中尺度切变线、700hPa 低涡东侧强辐合区生成和发展的,MCC 是造成陕西中南部大暴雨天气直接原因,强降水发生在 TBB 的低值中心及 TBB 等值线密集区域,最强降水出现在 MCC 的成熟期。

(3) 700hPa 高、低值湿位涡分别与冷、暖湿气流相联系,湿正压位涡零线附近等值线密集区是冷暖气流相互作用的区域,暴雨区发生在低层湿位涡的零线冷暖空气交汇区及负值区等值线密集的暖区中;湿位涡“正负区叠加”的配置是暴雨发展的有利形势,高层正的高值位涡的下传有利于气旋性涡度的发展,低层的负位涡区有利于对流的发展。这两者的结合有利于暴雨产生。

(4) 700hPa 低涡东侧的强辐合区与 200hPa 西北风高空急流右侧的强辐散区叠置,为暴雨区提供了持续强劲的上升运动,200hPa 西北风高空急流为暴雨区带来干冷空气,与低层暖湿气流之间形成强烈位势不稳定,为强对流的形成、发展提供了十分有利的条件。

## 参考文献

- [1] 吴国雄,蔡雅萍,唐晓青. 湿位涡和倾斜涡度发展[J]. 气象学报,1995,53(4):387-404.
- [2] 熊秋芬,胡江林,张耀存. 梅雨锋降水带中不同地域大暴雨成因的对比分析[J]. 气象,2006,32(7):72-80.
- [3] 杨宏青,陈正洪,石燕,等. 长江流域近 40 年强降水的变化趋势[J]. 气象,2005,31(3):66-68.
- [4] 赵玉春,李泽椿,肖子牛. 南半球冷空气爆发对华南连续性暴雨影响的个例分析[J]. 气象,2007,33(3):40-47.
- [5] 刘国忠,丁治英,贾显锋,等. 影响华南地区西南低涡及致洪低涡活动的统计研究[J]. 气象,2007,33(1):45-50.
- [6] 刘玉芝,邹树峰,王广春. “93.8”中尺度对流复合体的云图分析[J]. 气象,1996,22(12):20-23.
- [7] 伍星赞,纪英惠. 华南地区 MCC 云图特征和成因分析[J]. 气象,1996,22(4):32-36.
- [8] 寿绍文,励申申,姚秀萍. 中尺度气象学[M]. 北京:气象出版社,2003:121.
- [9] 张小玲,孙建华,陶诗言,等. 2002 年 8 月湖南致洪强降水过程与成因分析[J]. 气候与环境研究,2004,9(3):476-493.
- [10] 徐海明,何金海,周兵. “倾斜”高空急流轴在大暴雨过程中的作用[J]. 南京气象学院学报,2001,24(2):155-161.
- [11] 王小曼,丁治英,张兴强. 梅雨暴雨与高空急流的统计与动力分析[J]. 南京气象学院学报,2002,25(1):111-117.
- [12] 俞小鼎,姚秀萍,熊廷南,等. 新一代天气雷达原理与应用讲义[R]. 中国气象局培训中心,2004:101-185.
- [1] 吴国雄,蔡雅萍,唐晓青. 湿位涡和倾斜涡度发展