

梁生俊, 马晓华. 西北地区东部两次典型大暴雨个例对比分析[J]. 气象, 2012, 38(7): 804-813.

# 西北地区东部两次典型大暴雨个例对比分析<sup>\*</sup>

梁生俊 马晓华

陕西省气象台, 西安 710015

**提 要:** 利用常规高空地面资料、陕西省自动站逐时降水资料及 NCEP  $1^\circ \times 1^\circ$  再分析资料, 分别对 2010 年 7 月 23—24 日 (“0723”) 和 2011 年 7 月 28—29 日 (“0728”) 两次暴雨过程做了对比分析。结果表明: 相对稳定的环流形势是两次大暴雨发生发展的有利背景; “0723” 大暴雨发生前期低空急流就已建立, “0728” 过程中伴随低空急流的形成, 高空急流增强转竖, 强降水发生; “0723” 大暴雨期间热带低压 “灿都” 东侧偏南气流沿副高外围形成了一条宽而强的水汽输送通道, 将南海大量的水汽和能量直接输送到陕西, “0728” 大暴雨期间热带风暴 “洛坦” 北部的偏东南气流沿副高外围与孟加拉湾的西南气流合并后经华南、华中输送至暴雨区上空; 两次过程期间陕西省均位于  $\theta_{se}$  高值区; 两次过程均有干冷空气入侵、位涡扰动沿  $\theta_{se}$  密集区下滑的现象。位涡随时间的变化与强降水随时间的变化几乎保持一致, 位涡大值的出现预示着强降水的发生。

**关键词:** 大暴雨, 环流背景, 高低空急流, 台风, 干侵入

## Comparative Analysis of Characteristics of Two Typical Rainstorm Cases in the East of Northwest China

LIANG Shengjun MA Xiaohua

Shanxi Provincial Meteorological Observatory, Xi'an 710015

**Abstract:** The conventional surface and upper-air sounding meteorological data, the hourly precipitation data from AWS in Shaanxi Province and the NCEP  $1^\circ \times 1^\circ$  reanalysis data were used to analyze two rainstorm processes respectively in 23–24 July 2010 (“0723”) and 28–29 July 2011 (“0728”). The results show that: the relatively stable circulation is the favorable background to the development of two major rainstorms, the low-level jet has established at early period of the “0723” precipitation. For the “0728” rainstorm, jet stream was from east to west at its early period; accompanied with the formation of low-level jet, the high-level jet stream enhances and turns upright, then heavy precipitation occurred. The southerly flow in the east of tropical depression “Chanthu” formed a wide and strong water vapor transport channel along the periphery of the subtropical high, however, the southeast airflow in the north of tropical storm “Nock-ten” merged with the southwest airflow from the Bay of Bengal and then transported to the rainstorm area during the “0728” rainstorm. Shaanxi Province is located in high-energy areas of  $\theta_{se}$  during the two rainstorm processes. There are invasions of the dry and cold air, and potential vorticity disturbance declines along the intensive areas of  $\theta_{se}$  in the two processes of rainstorm. Temporal changes in potential vorticity and precipitation almost take place simultaneously, and the appearance of large values of potential vorticity indicates the occurrence of rainstorm.

**Key words:** heavy rainstorm, atmospheric circulation, high- and low-level jet, typhoon, dry air intrusion

\* 国家自然科学基金(40975087)资助

2012 年 1 月 16 日收稿; 2012 年 2 月 27 日收修定稿

第一作者: 梁生俊, 主要从事天气预报理论与方法研究工作. Email: liangsj309@sina.com

## 引言

陕西省地处西北地区东部,是我国暴雨多发地区之一,暴雨往往具有历时短、强度大、局地性强等特点<sup>[1]</sup>,由于其独特的地形地貌易造成局部洪涝灾害。近年来许多气象工作者对陕西暴雨做了全面的分析研究:胡淑兰等<sup>[2]</sup>、毕宝贵等<sup>[3]</sup>认为在有利的大尺度环流背景下, $\beta$ 中尺度系统是强降水形成的直接影响系统;慕建利等<sup>[4]</sup>对比分析地闪与陕西一次暴雨发生发展的关系,表明地闪的发生和急剧增加对暴雨发生和发展加强有很好指示意义,初闪的发生提前于强降水发生,地闪急剧增加与降水强度猛增密切相关,负地闪发生密集区是未来强降水发生区。郭大梅等<sup>[5]</sup>研究了陕西中南部一次突发性大暴雨,分析结果表明500 hPa中尺度切变线、700 hPa低涡是本次暴雨的主要影响系统,MCC是造成此次暴雨的直接原因。许新田等<sup>[6]</sup>研究了陕西一次强对流天气,结果表明中高层冷槽和低层暖温度脊、湿舌的上下叠置,有利于对流不稳定的建立和发展。侯建忠等<sup>[7]</sup>通过对2007年陕西两次区域性大暴雨的分析发现,台风远距离的影响作用明显,台风在海南附近时,大暴雨出现在秦岭以南,台风在台湾附近时,大暴雨出现在秦岭以北。陕西重大洪灾与近海台风的相关率达90%<sup>[8]</sup>。顾清源等<sup>[9]</sup>认为暴雨的主要触发系统是副热带高压和台风外围持续强劲的

东南风低空急流,持续的东南风低空急流为暴雨区输送了源源不断的水汽和不稳定能量。杜继稳等<sup>[10]</sup>对青藏高原东北侧突发性暴雨地面能量场特征做了分析,发现突发性暴雨发生时,地面能量场存在 $\alpha$ 中尺度的 $\Omega$ 系统,其空间尺度陕北在200~300 km、关中在250~450 km,生命史均在10~15 h,突发性暴雨发生在 $\Omega$ 系统发生发展的最强盛时期,落区位于该 $\Omega$ 系统的高能比轴附近。

陕西省暴雨最易发生在6—9月,主要集中在7月份,尤其是在7月中上旬,本文所选个例均发生在7月下旬,预报上有难度,因此有必要对其做重点分析研究,揭示形成原因,寻找异同总结预报着眼点,以此提高预报准确性,为减少灾害做好服务工作。

文中主要使用NCEP/NCAR逐6小时资料,水平分辨率为 $1^\circ \times 1^\circ$ ,常规高空和地面资料及陕西省自动站逐时加密的地面降水资料。

## 1 两次暴雨过程天气概况

2010年7月23日08时至24日08时(北京时,下同,简称“0723”),陕北南部、关中西部、北部和陕南东部共出现28县(市)暴雨,其中大于100 mm有12县(市),1县(市)大于200 mm(图1a);强降水最先出现在陕北南部、关中地区,最强降水时段为23日18时至24日08时,镇巴、陈仓、潼关、黄陵等站降水呈“双峰型”(图略)。

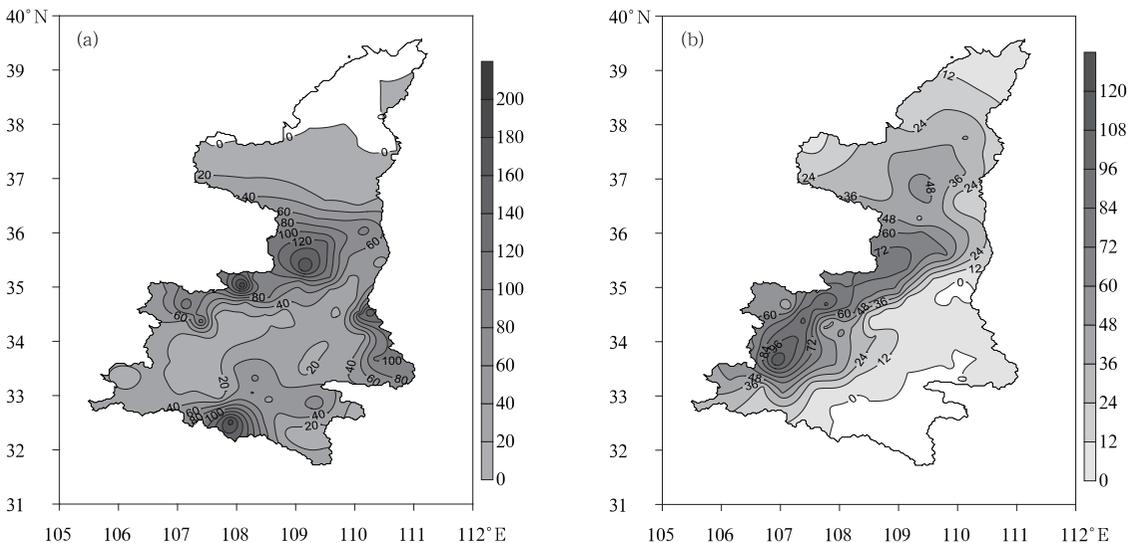


图1 陕西两次强降水过程降水量(单位:mm)

(a)2010年7月23日08时至24日08时降水量,(b)2011年7月28日08时至29日08时降水量

Fig.1 Rainfall distributions in two heavy rainstorm processes in Shaanxi (unit: mm)

(a) 08:00 BT 23 to 08:00 BT 24 July 2010, (b) 08:00 BT 28 to 08:00 BT 29 July 2011

2011年7月28日08时至29日08时(简称“0728”),陕西省强降水主要分布在陕北南部、关中中西部、陕南西部地区,共出现25县(市)暴雨,其中大于100 mm有1县(市)位于汉中的留坝,过程累积雨量120.8 mm(图1b);此次强降水中心自西南向东北移动明显,并且随着雨带北移雨强逐渐减小,最强降水时段为28日13时到29日06时,从逐小时降水量图上可以看出“0728”降水量随时间变化呈“单峰型”(图略)。

## 2 两次暴雨过程对比分析

### 2.1 环流背景特征

“0723”大暴雨期间,500 hPa 平均高度场上亚

洲中高纬呈“两槽一脊”形势(图2a),贝加尔湖西北部的冷低压底部分裂出的切断低压位于巴尔喀什湖上空,中心强度为568 dagpm,鄂霍次克海上空维持一中心强度为568 dagpm的切断低压,整个贝加尔湖上空为高压脊,高压中心位于蒙古国及我国内蒙古上空,副热带高压稳定在太平洋洋面上,在西南地区南部有一登陆的热带低压。从23日08时至24日08时500 hPa 高度场上均可以看到陕西处于低压中心处(图略)。700 hPa “东高西低”的环流形势有利于陕西强降水的发生(图略),陕西位于副热带高压和高原低压之间,从南向北形成了一条强风带,在关中西部、陕南西部有一低涡切变,陕北南部风场气旋性旋转明显,此形势一直维持到24日08时。850 hPa 整个强降水期间一直维持偏南风(图略)。

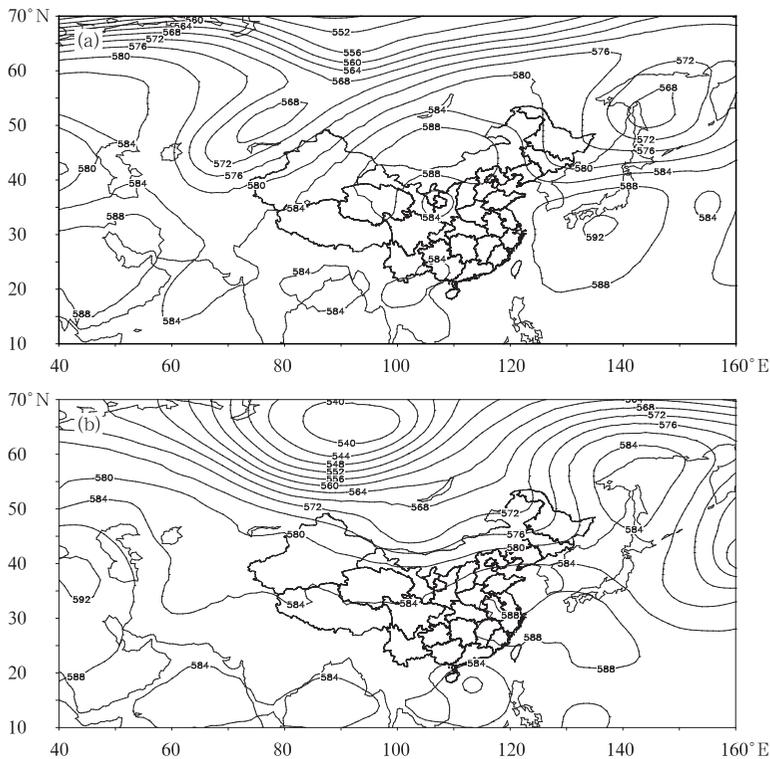


图2 两次强降水期间500 hPa 平均高度场(单位:dagpm)

(a)2010年7月23日08时至24日08时,(b)2011年7月28日08时至29日08时

Fig. 2 The 500 hPa average geopotential height fields over Eur-Asia in two rainstorm processes (unit: dagpm)

(a) 08:00 BT 23 to 08:00 24 July 2010, (b) 08:00 BT 28 to 08:00 29 July 2011

“0728”大暴雨期间,500 hPa 平均高度场上亚洲中高纬度维持稳定的“一槽一脊”形势(图2b),在贝加尔湖以西有一个中心强度为540 dagpm 的冷

低压中心,强大的低压中心底部分裂的冷空气向东南方向下滑到达我国西北地区。鄂霍次克海上空维持一中心强度为584 dagpm 的阻塞高压,副热带高

压呈带状分布,控制了我国江南大部分地方,同时在南海上有热带风暴形成,陕西处于槽前西南气流中。从27日08时至29日08时副热带高压经历了快速的西伸北抬之后又东移的过程,特别是28日20时副热带高压脊点到达 $109^{\circ}\text{E}$ ,脊线位于 $31^{\circ}\text{N}$ (图略),陕西处于副热带高压西北侧,高原槽前部西南气流控制下。700 hPa上(图略),从27日20时开始陕西上空为一直的偏南气流,28日08时宁夏到甘肃东部有一切变,28日20时切变线南压到陕北南部,关中、陕南西部,整个陕西风速加大到 $12\sim 14\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,29日08时切变线仍然维持,20时陕西上空转为一致的偏北风。850 hPa上(图略),28日08时至29日08时陕西一直位于高原低涡前部的辐合区内,有利于底层水气的辐合上升。

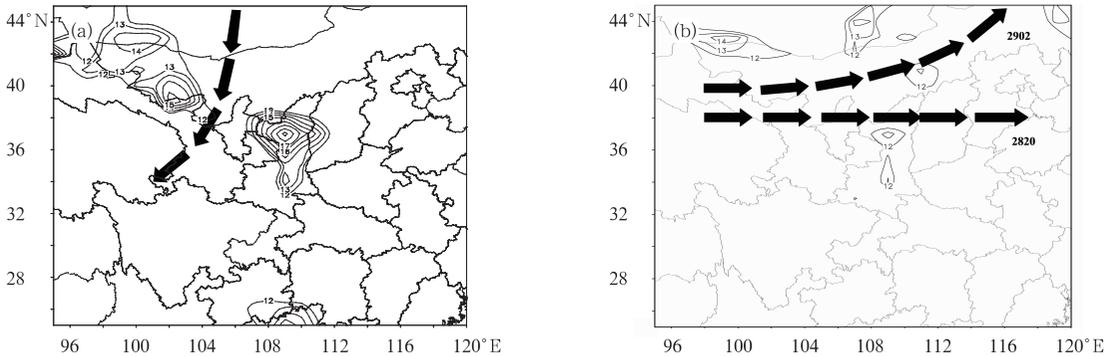


图3 两次强降水期间200 hPa高空急流(箭头:风速大于 $30\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ )和700 hPa低空急流(等值线:风速大于 $12\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ )

(a)2010年7月23日20时,(b)2011年7月28日20时

Fig. 3 The 200 hPa (arrows:  $>30\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) and 700 hPa (contour:  $>12\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) jet streams

(a) 20:00 BT 23 July 2010, (b) 20:00 BT 28 July 2011

“0728”强降水中,高空急流呈东北—西南向分布,28日14时开始低空急流才逐渐形成,高空急流轴有转竖的趋势,20时(图3b)低空急流中心风速达到 $13\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,此时高空急流轴转竖程度加大,29日02时,高低空急流发展最强,低空急流中心风速大于 $15\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,高空急流转竖非常明显,强降水就发生在高空急流转竖这个阶段,这与文献中的结论相一致<sup>[11]</sup>。

两次过程低空均有偏南急流建立,低空急流作为低层动量、热量和水汽的集中输送带,对陕西暴雨的产生、维持和加强起着重要的作用。“0723”强降水中,低空急流强度远强于“0728”,同时“0723”降水发生时,高空急流呈现南北向,急流前端到达陕西,急流轴左前侧有强的辐散场,低层水汽大量辐合,这

## 2.2 高低空急流

“0723”强降水期间南亚高压异常的强盛,且位置偏北,陕西位于其东侧的偏北气流控制下,高空急流轴自北向南,从23日08时到24日08时,高空急流逐渐向南伸展,同时低空急流自南向北靠近陕西,急流中心风速快速增大,(图3a)高低空急流前沿均伸到陕西附近,低空急流中心风速达到了 $20\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。“0723”过程高空急流分布型不同于常规的东西向急流分布型,高空急流核左前侧有间接热力环流上升支,右前侧为下沉支,所形成的间接环流上升支正好与低空急流轴附近的上升气流耦合,产生强上升运动,暴雨落区就位于高低空急流耦合区下方。

种配置引起了强烈的上升运动。“0728”暴雨增幅时高空急流有增强转竖的趋势,降水落区均位于高低空急流耦合的地方。

## 2.3 台风对两次暴雨的作用

陕西省位于西北地区东部,地形条件相当复杂,一般情况下,来自海上的水汽不易被输送到这一区域来,因此对陕西暴雨研究时,水汽输送就显得尤为重要。有学者指出<sup>[12-15]</sup>台风外围的气旋性环流往往在低空形成宽广的偏东或者偏南气流带,形成暴雨区的主要水汽输送和能量通道。

2010年第3号台风灿都7月19日生成,登陆后23日17时在广西西部减弱为热带低压。“0723”强降水水汽主要集中在中低层,从700 hPa平均水

汽通量场上(图 4a)可以看出本次过程的水汽主要是由热带低压“灿都”东侧的偏南气流输送的,来自南海的暖湿气流被热低压带到陆地上,且一直向北输运到达陕西境内,陕西出现了中心强度大于  $10 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$  的水汽通量,风场上明显的辐合就在陕西上空,在风场气旋性曲率最大的地方正好与降水落区吻合(图 1a),从每隔 6 小时 700 hPa 水汽通量和水汽通量散度场上(图略)可以看出,陕西处于湿舌前端,从 22 日 20 时到 23 日 08 时陕西上空水汽通量散度场出现了快速的增大,从  $-4 \times 10^{-5} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$  迅速增大到  $-16 \times 10^{-5} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ,强的水汽辐合一直持续到 24 日 08 时,之后又迅速减小到  $-6 \times 10^{-5} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

2011 年 7 月 27 日上午,第 8 号热带风暴洛坦以每小时  $10 \sim 15 \text{ km}$  的速度向西偏北方向移动,27

日下午到夜间穿过菲律宾吕宋岛进入南海中部偏东海面。“0728”个例从 700 hPa 平均水汽通量场上(图 4b)可以看出本次过程的水汽有两支,水汽的水平输送通道始于南海和孟加拉湾,热带风暴洛坦北部的偏东南气流与孟加拉湾的西南气流合并后经华南华中输送至暴雨区上空,而且范围广、风速大,为暴雨的产生提供了充足的水汽和能量。

通过以上分析,“0723”强降水为什么强于“0728”,究其原因,水汽是很重要的一条。“0723”强降水水汽明显强于“0728”是因为远距离热带低压正好于 23 日傍晚登陆,陕西上空水汽通量和水汽通量辐合出现了快速增大。“0728”强降水水汽来源于孟加拉湾和热带低压外围,但由于远距离热带低压在南海海面上继续北行,输送到陕西的水汽和能量并不充足,因此两次过程在雨强上出现了明显的差别。

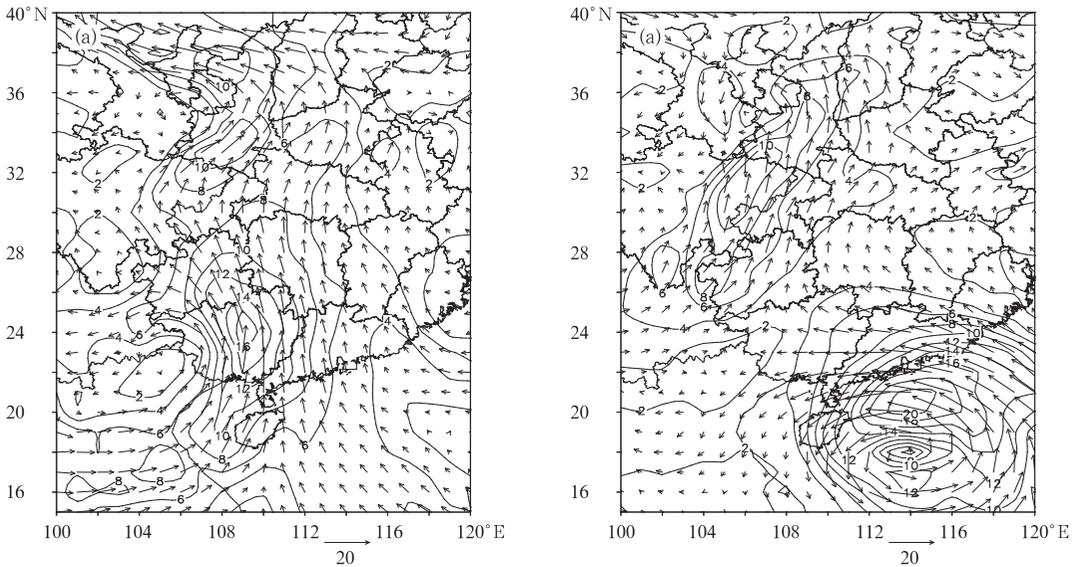


图 4 两次强降水期间 700 hPa 平均水汽通量(单位:  $\text{g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ )和风场(单位:  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )

(a)2010 年 7 月 23 日 08 时至 24 日 08 时, (b) 2011 年 7 月 28 日 08 时至 29 日 08 时

Fig. 4 The 700 hPa average water vapour flux (unit:  $\text{g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ )

and wind field (unit:  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ) in two rainstorm processes

(a) 08:00 BT 23 to 08:00 BT 24 July 2010, (b) 08:00 BT 28 to 08:00 BT 29 July 2011

## 2.4 动力条件

“0723”个例动力条件表明正涡度的垂直层次发展深厚,从 20 时过暴雨中心的涡度经向剖面上清楚地看到(图 5a),在  $35^\circ\text{N}$  上空 700 hPa 有  $15 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$  的涡度中心,300 hPa 附近有个  $-12 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$  的负值中心,这种低层辐合、高层辐散的动力配

置加强和维持了强上升运动(图 5c),在 750 和 450 hPa 上各有中心为  $2.1 \text{ Pa} \cdot \text{s}^{-1}$  的强上升气流,上升运动集中在 2 个纬距非常窄的地区,在其南北两侧各有下沉运动,这种分布形成的反馈机制进一步维持了上升运动的发展,与“0723”强降水相对应,直到 24 日 08 时整个涡度场从低层到高层全部转为正涡度区,高层的辐散完全消失(图略),此时强降水

过程结束。

“0728”个例中 28 日 20 时西北地区东部对流层下半部分为正涡度,上半部分为负涡度,700 hPa 有中心为  $9 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$  的大值中心(图 5b),强上升运动

就出现在 700 hPa 向上,最强上升运动中心  $1.8 \text{ Pa} \cdot \text{ s}^{-1}$  出现 400 hPa(图 5d),南北两侧有弱的下沉运动,此次过程强降水就发生在夜间这个时段。

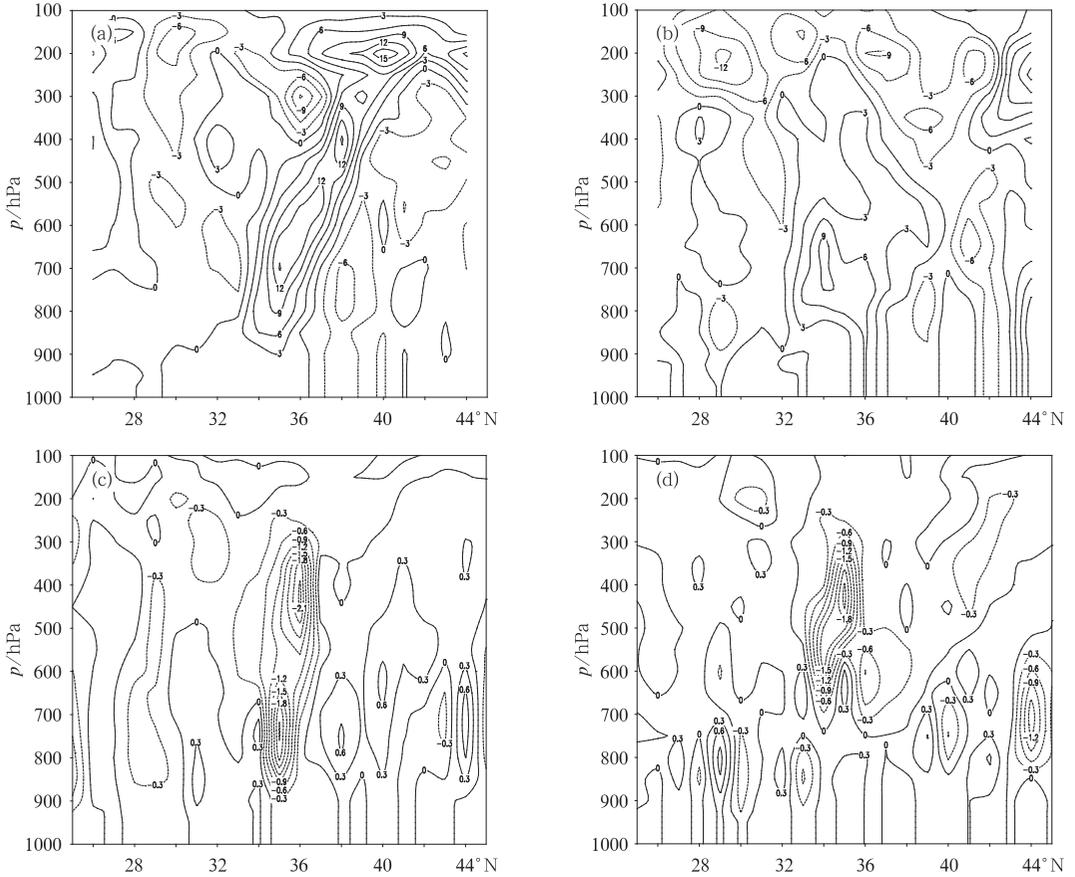


图 5 过暴雨中心涡度-经向剖面(a,b; 单位: $10^{-5} \text{ s}^{-1}$ )、垂直速度-经向剖面(c,d; 单位: $\text{Pa} \cdot \text{ s}^{-1}$ )

(a,c) 2010 年 7 月 23 日 20 时, (b,d) 2011 年 7 月 28 日 20 时

Fig. 5 The radial vertical cross-sections of vorticity profile (a,b; unit:  $10^{-5} \text{ s}^{-1}$ )

and vertical profiles (c,d; unit:  $\text{Pa} \cdot \text{ s}^{-1}$ ) across storm center

(a,c) 20:00 BT 23 July 2010, (b,d) 20:00 BT 28 July 2011

### 2.5 热力条件

#### 2.5.1 $\theta_{se}$ 分析

“0723”暴雨发生前 12 小时,850 hPa  $\theta_{se}$  图上(图略)关中中部、陕南均位于 350 K 高值区内,陕北和关中北部位于  $\geq 340 \text{ K}$  高值区内,这种能量分布特征持续到 14 时,大暴雨开始,高能平流为陕西大暴雨的产生积累了充分的能量,同时分析了过暴雨中心  $\theta_{se}$  的垂直剖面图(图略),在整个暴雨期间,从低层到 500 hPa 陕西处于对流不稳定大气中。

“0728”暴雨期间 850 hPa  $\theta_{se}$  场呈  $\Omega$  型。27 日

20 时(图略)陕西中南部位于高值右侧锋区中, $\theta_{se}$  值为 345~365 K, $\Omega$  系统的右侧有弱的干冷空气与假相当位温高值区暖湿气流交汇,28 日 20 时(图略),从西北方向下来的强干冷空气侵入高值区,此时陕西上空的高能轴呈现东南—西北向  $\Omega$  型分布特征,强降水发生,落区位于高能轴下方;29 日 08 时(图略),陕西上空的  $\theta_{se}$  值迅速减小,降水结束。可见  $\theta_{se}$  的增大、减小与强降水的发生具有良好的对应关系,对于强降水的预报具有一定的指示意义,强降水一般发生在  $\Omega$  高能轴下方。

过暴雨中心  $\theta_{se}$  的垂直剖面图(图略)上,对流不

稳定区一直向上延伸到 600 hPa,  $\frac{\partial \theta_{sc}}{\partial p} \approx -\frac{1}{20}$ ,

“0723”过暴雨中心  $\frac{\partial \theta_{sc}}{\partial p} \approx -\frac{3}{35}$  (图略), 由此可看出

“0723”过程大气对流不稳定程度远强于“0728”过程, 这也解释了为什么“0723”降水强于“0728”降水。

### 2.5.2 K 指数分析

K 指数的变化可以表征环境场的热力条件, 是中低层稳定性和湿度条件的综合指标, 通常 K 指数越大, 层结越不稳定, 大气潜在能量越大<sup>[16]</sup>。

“0723”暴雨个例中, 在暴雨发生前 12 小时(图略), 陕西 K 指数在 30℃ 以上, 23 日 08 时(图略) K 指数增大到 32~40℃ 之间, 特别是陕西南部地区 K 指数大于 40℃, 23 日 20 时(图略) K 指数维持在 36~40℃ 之间, K 指数出现了一个规则的 Ω 型, 陕西处于 Ω 东侧拐点附近, 这里冷暖空气交汇, 有利于

不稳定能量的增大, 对暴雨中尺度系统的产生非常有利, 24 日 08 时(图略) K 指数迅速减小到 32℃ 左右, 降水强度逐渐减弱。

“0728”暴雨期间, 7 月 27 日 20 时(图略), 中心值为 36℃ 的 K 指数区域位于陕北上空, 同时在四川东北部有一中心为 44℃ 的大值中心伸向陕西南部, 28 日 08 时(图略) 关中陕南 K 指数值均大于 30℃, 这种不稳定层结的潜在能量一直持续到 28 日 20 时(图略), 最强降水正好出现在 28 日晚间到 29 日 06 时, 29 日 08 时(图略) 陕西的 K 指数等值线分布稀疏, 值迅速减小, 大部分地区 K 指数值小于 30℃, 强降水也逐渐结束。

### 2.6 干侵入分析

两次过程 24 h 累积降水量最大自动站分别为

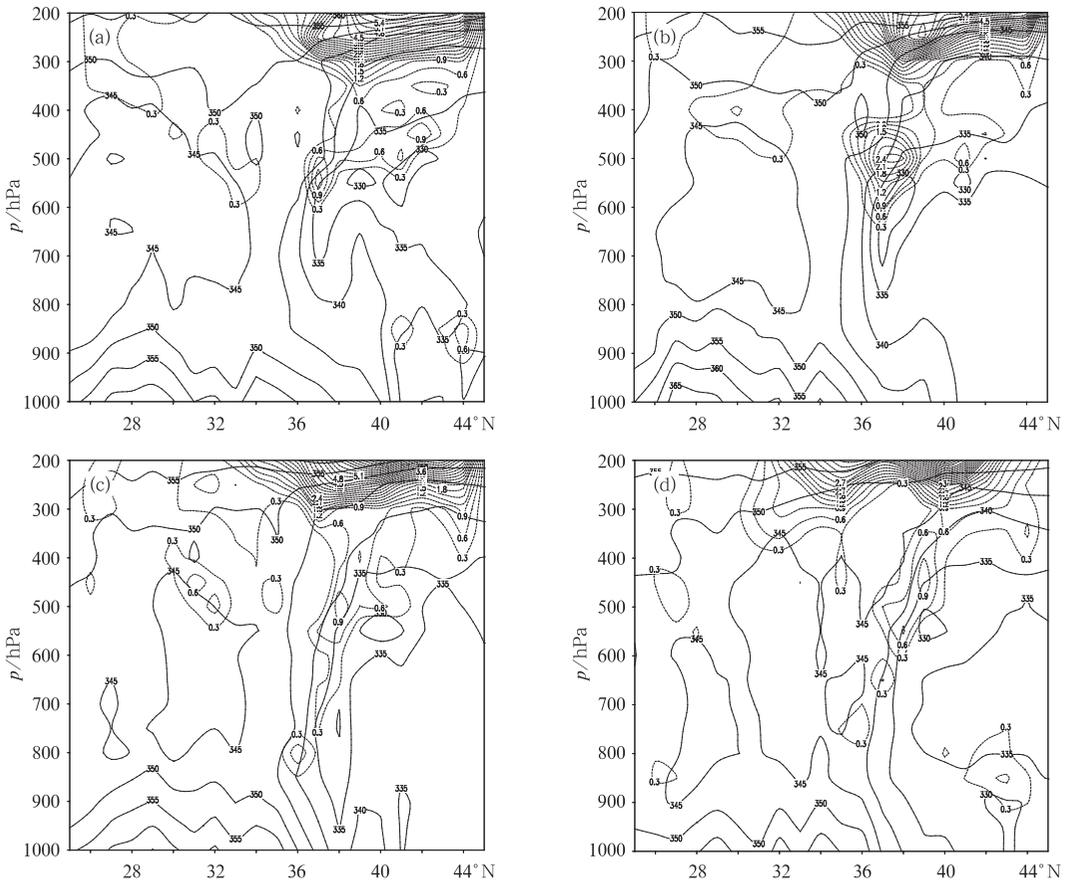


图 6 过彬县暴雨中心  $\theta_{sc}$  (实线, 单位: K) 和位涡 (点线, 单位: PVU) 经向剖面叠加

(a) 2010 年 7 月 23 日 08 时, (b) 2010 年 7 月 23 日 14 时, (c) 2010 年 7 月 23 日 20 时, (d) 2010 年 7 月 24 日 02 时

Fig. 6 The radial vertical cross-sections of  $\theta_{sc}$  profile (solid, unit: K), and potential vorticity profile (dotted, unit: PVU) across Binxian Station

(a) 08:00 BT 23 July 2010, (b) 14:00 BT 23 July 2010,

(c) 20:00 BT 23 July 2010, (d) 02:00 BT 24 July 2010

彬县和留坝站,因此选取这两个站做代表来研究干侵入的作用。

### 2.6.1 “0723”位涡下传特征

从过彬县站(35.02°N,108.06°E)的位涡和假相当位温剖面叠加图上看出,23日08—20时在干空气侵入过程中,高纬度对流层顶附近的高位涡空气具有沿等假相当位温密集区下滑的特征:由图可见(图6a),在550 hPa,36°~38°N上空有一中心为1.2 PVU的高位涡区存在,0.3 PVU的位涡区向下延伸到600 hPa。14时(图6b),对流层顶冷空气强度增强,500 hPa,35°~38°N上空冷空气中心强度大于2.4 PVU,0.3 PVU的位涡区向下延伸到600 hPa以下。20时(图6c),中心强度大于0.6 PVU的干冷空气下滑到36°N,800 hPa以下。24日02时(图6d),0.3 PVU的干空气仍维持在35°~36°N上空800 hPa附近,02时以后干冷空气势力逐渐减弱。从23日08—20时35°N以北,500 hPa以下层结不稳定结构为对流的发展起到了有利的条件,位涡高值区在此次过程中沿 $\theta_{se}$ 密集区下滑,本次过程低层从南自北的暖湿气流非常强盛,高层的干冷空气下沉与暖空气在800 hPa附近交汇,这种上冷干、下暖湿的空气配制对此次暴雨的发展和维持有积极作用。

### 2.6.2 “0723”干侵入与降水的关系

由23日08时至24日08时彬县站700 hPa位涡和降水量随时间变化(图7)可以看出,从23日14时开始位涡逐渐增大,到20时第一次达到极值,从

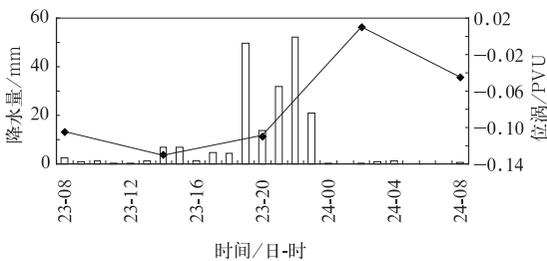


图7 2010年7月23日08时至24日08时彬县站700 hPa位涡随时间的变化(折线)及逐小时降水量(柱状图)

Fig. 7 The temporal variation of 700 hPa potential vorticity (solid, unit: PVU) and 1 hourly precipitation (histogram, unit: mm) across Binxian Station during 08:00 BT 23 to 08:00 BT 24 July 2010

20时到24日02时位涡随时间迅速增大达到第二次极值,之后位涡逐渐减小,对应降水图上从23日14时开始彬县站降水增加,19时达 $49.6 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 的降水量,19时之后到23时降水量几乎都在 $20 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 以上,最大降水量为22时 $52.36 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 。从以上分析可以看出,彬县站700 hPa位涡随时间的变化趋势与降水强度随时间的变化趋势几乎一致,位涡极值的出现对应降水强度极值的出现。

### 2.6.3 “0728”位涡下传特征

从过留坝站(33.38°N,106.56°E)的位涡和假相当位温剖面叠加图上看出,28日08时至29日08时在干空气侵入过程中,高纬度对流层顶附近的高位涡空气仍然具有沿等假相当位温密集区下滑的特征:28日08时(图8a),从40°N上空自北向南逐渐有干冷空气从高层入侵低层,冷空气范围比较广,位涡扰动沿着假相当位温密集带不断向南、向下输送33°N上空,900 hPa附近。到14时(图8b),34°~40°N上空500 hPa附近有强度为0.6 PVU的大值中心,且范围明显比上一时刻变大。但此时没有位涡扰动入侵到低层。20时(图8c),位涡高值区沿 $\theta_{se}$ 密集区被垂直向下输送到800~900 hPa附近,此时高层500 hPa,34°~38°N上空再次有干冷空气形成,到29日02时(图8d)高层的干冷空气继续垂直向下输送与之前的冷空气合并,使得干冷空气势力增强,700 hPa,36°N上空出现0.9 PVU的大值中心,低层的冷空气前沿已经到达900 hPa,33°N上空,冷空气势力比较强。29日08时(图略),34°N,750 hPa仍有高位涡大值中心存在,但是位涡扰动并没有入侵低层暖空气,而是停留在对流层中层,因此没有造成强的降水。

### 2.6.4 “0728”干侵入与降水的关系

28日08时至29日08时留坝站850 hPa位涡和降水量随时间变化(图9)可以看出:28日20时开始留坝上空位涡值迅速增大,短短6小时内,从-0.45 PVU跳跃到0.7 PVU,之后强度维持不变。从降水量图上可以看出,21时留坝出现了 $16 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 的降水量,可见位涡值的快速增大与强降水的发展几乎同步。

通过以上分析可以看出,“0723”强降水过程中高层干冷空气具有强度高、范围小的特点,“0728”过程中高层干冷空气范围大、强度弱,但两次过程位涡

扰动均是沿着  $\theta_{se}$  密集区下滑,“0723”过程中只有小股干冷空气以 0.3~0.6 PVU 的强度逐渐下滑到 800 hPa 附近,大部分还是停留在对流层中高层。“0728”过程中,28 日 20 时冷空气突然侵入低层 800 hPa 附近,位涡中心值大于 0.6 PVU,之后新的

冷空气并入之前的干冷空气使得冷空气势力增强,到 29 日 02 时中心强度为 0.6 PVU 的干空气侵入到 900 hPa 以下。位涡随时间的变化与强降水随时间的变化几乎保持一致,位涡大值的出现预示着强降水的发生。

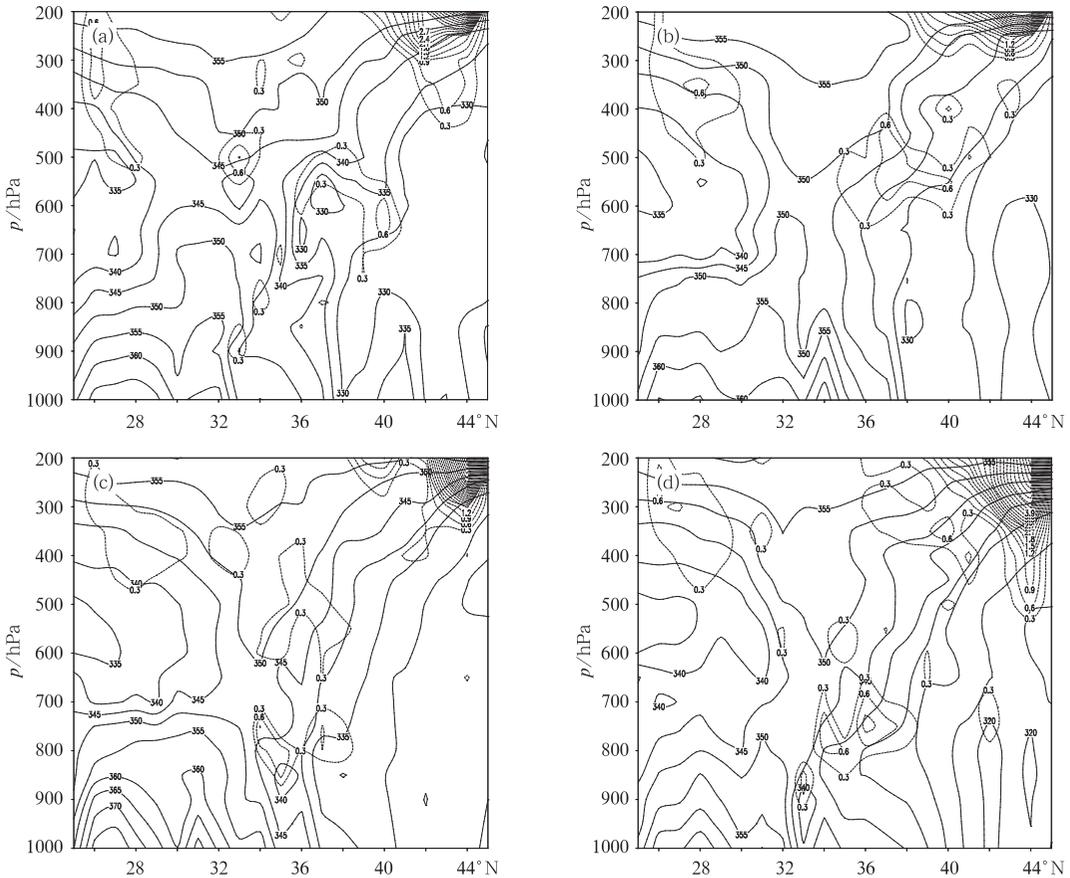


图 8 过留坝暴雨中心  $\theta_{se}$ (单位:K)和位涡(单位:PVU)经向剖面叠加  
(a)2011 年 7 月 28 日 08 时, (b) 2011 年 7 月 28 日 14 时,  
(c)2011 年 7 月 28 日 20 时, (d) 2011 年 7 月 29 日 02 时

Fig. 8 Same as Fig. 6, but for Liuba Station in 28–29 July 2011

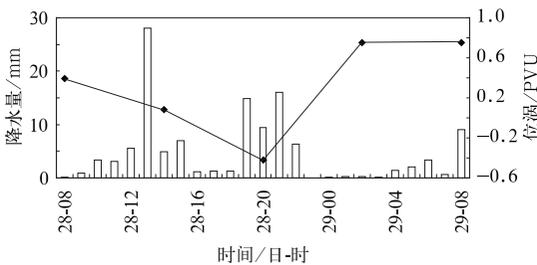


图 9 2011 年 7 月 28 日 08 时至 29 日 08 时  
留坝站 850 hPa 位涡随时间的变化  
(折线)及逐小时降水量(柱状图)

Fig. 9 The same as Fig. 7,  
but for 850 hPa and Liuba Station

### 3 结 语

(1) 中高纬稳定的环流形势是大暴雨发生的有利背景,中纬度“东高西低”的环流分布是陕西产生大暴雨的基本形势之一,两次大暴雨均是在大尺度和中小尺度系统相互作用下产生的,高低空急流、低涡切变是主要影响系统。

(2) 低空急流作为水汽和能量的输送带,对两次大暴雨的产生、维持和发展起了重要作用,特别是“0723”大暴雨期间,登陆的热带低压“灿都”东侧强

的偏南风输送,在副热带高压外围建立了一股宽而强的低空急流,急流将水汽能量输送到陕西后出现了明显的风向辐合,强降水落区就位于辐合最强处。“0728”大暴雨期间水汽的水平输送通道始于南海和孟加拉湾,而且范围宽、风速大,在强降水发生前发展成低空急流,为暴雨的产生提供了充足的、源源不断的水汽和能量。

(3) 高空急流最大中心入口处由于超地转风作用,形成了直接热力环流,出口区形成间接热力环流,陕西暴雨一般均发生在高空急流右侧,而“0723”大暴雨期间,由于南亚高压偏强偏北,在其东侧的偏北风便形成了南北向的高空急流带,强降水落区位于其东侧,在高空急流出口区左侧形成的间接热力环流上升支叠加到低空急流上,使得低空急流附近空气辐合上升。“0728”大暴雨期间高空急流呈东西向且增强转竖,降水就发生在直接热力环流上升支下方,高空急流增强转竖时。

(4) 两次降水过程发生前,陕西上空大气均处于对流不稳定区内,且  $K$  指数值已经到达  $30\sim 40^{\circ}\text{C}$  之间,“0723”大暴雨强于“0728”大暴雨的原因可能是,远距离热带低压“灿都”起了重要作用,“0723”过程水汽输送强度远大与“0728”水汽输送强度,并且在“0723”暴雨期间,大气对流不稳定能量很高,是“0728”对流不稳定能量的2倍。

(5) 两次暴雨产生过程中均有干冷空气的入侵,对暴雨的发生、发展有重要作用,“0723”中高层干冷空气具有强度强、范围小的特点,“0728”过程中高层干冷空气具有范围大、强度弱的特点,但是两次过程均有位涡扰动沿  $\theta_{se}$  密集区下滑的现象,位涡随时间的变化与强降水随时间的变化几乎保持一致,位涡大值的出现预示着强降水的发生。

## 参考文献

- [1] 杜继稳. 陕西省短期天气预报[M]. 北京: 气象出版社, 2007: 23.
- [2] 胡淑兰, 李社宏, 武麦风, 等. 陕西中北部一次大暴雨天气过程分析[J]. 干旱区研究, 2009, 2(2): 287-293.
- [3] 毕宝贵, 刘月巍, 李泽椿. 2002年6月8—9日陕南大暴雨系统的中尺度分析[J]. 大气科学, 2004, 28(5): 747-761.
- [4] 慕建利, 李泽椿, 湛芸. 一次强暴雨过程地闪活动特征与中尺度对流系统和强降水的关系[J]. 气象, 2012, 38(1): 56-65.
- [5] 郭大梅, 许新田, 刘勇, 等. 陕西中南部一次突发性大暴雨过程分析[J]. 气象, 2008, 34(9): 40-46.
- [6] 许新田, 刘瑞芳, 郭大梅, 等. 陕西一次持续性强对流天气过程的成因分析[J]. 气象, 2012, 38(5): 533-542.
- [7] 侯建忠, 许新田, 张小玲, 等. 热带气旋活动对陕西2007年两次大暴雨影响的综合分析[J]. 成都信息工程学院学报, 2008, 23(5): 537-543.
- [8] 侯建忠, 张弘, 李明娟, 等. 台风活动队陕西重大洪灾时间影响的综合分析[J]. 气象, 2010, 36(9): 94-99.
- [9] 顾清源, 肖递祥, 黄楚惠, 等. 低空急流在副高西北侧连续性暴雨中的触发作用[J]. 气象, 2009, 35(4): 59-67.
- [10] 杜继稳, 李明娟, 张弘, 等. 青藏高原东北侧突发性暴雨地面能量场特征分析[J]. 高原气象, 2004, 23(4): 453-457.
- [11] 丁治英, 张兴强, 何金海, 等. 非纬向高空急流与远距离台风中尺度暴雨的研究[J]. 高原气象, 2010, 17(2): 144-153.
- [12] 陈联寿. 登陆热带气旋暴雨的研究和预报[G]. 第14届热带气旋论文摘要文集, 2007: 327.
- [13] 刘子臣, 梁生俊, 张建宏. 登陆台风对黄土高原东部暴雨的影响[J]. 高原气象, 1997, 16(4): 402-409.
- [14] 蒋尚城. 远距离台风影响西风带特大暴雨的过程模式[J]. 气象学报, 1983, 41(2): 147-158.
- [15] 侯建忠, 王川, 鲁渊平, 等. 台风活动与陕西极端暴雨的相关特征分析[J]. 热带气象学报, 2006, 22(2): 203-208.
- [16] 寿绍文, 励申申, 姚秀萍. 中尺度气象学[M]. 北京: 气象出版社, 2003: 296.