

陈春艳, 孔期, 李如琦. 天山北坡一次特大暴雨过程诊断分析[J]. 气象, 2012, 38(1): 72-80.

# 天山北坡一次特大暴雨过程诊断分析<sup>\* 1</sup>

陈春艳<sup>1</sup> 孔 期<sup>2</sup> 李如琦<sup>1</sup>

1 新疆气象台, 乌鲁木齐 830002

2 国家气象中心, 北京 100081

**提 要:** 利用常规资料、NCEP  $1^\circ \times 1^\circ$  再分析资料对 2007 年 7 月 16—17 日天山北坡出现的特大暴雨过程进行了诊断分析。结果表明: 暴雨发生在 100 hPa 南亚高压呈双体型、500 hPa 中亚低值系统在天山北坡东段稳定维持的环流背景下; 沿天山两侧的强东西风切变组织了系统性的强上升运动、低层向山的偏北气流与天山北坡向北开口的喇叭口地形产生的辐合上升运动促使暴雨强度增大; 暴雨区与低层辐合、高层辐散的气旋性涡柱区相对应; 来自孟加拉湾沿高原东侧偏南气流北上的水汽, 通过中高层的西南气流和低空的偏东气流两条路径接力输送到暴雨区; 正位涡异常与暴雨的发生关系密切。

**关键词:** 特大暴雨, 动力条件, 水汽条件, 位涡

## Analysis of a Major Rainstorm in the North Slope of Tianshan Mountains

CHEN Chunyan<sup>1</sup> KONG Qi<sup>2</sup> LI Ruqi<sup>1</sup>

1 Xinjiang Meteorological Observatory, Urumqi 830002

2 National Meteorological Centre, Beijing 100081

**Abstract:** On July 17, 2007, a major rainstorm occurred in the north slope of the Tianshan Mountains. The analysis results show that the circulation background of the rainstorm displays a two-body pattern of South Asia high and stabilization of low system in the middle of Asia. On the condition of steady stratification, the systematic ascending motion in the both sides of the Tianshan Mountains, the northern airflow in low levels, and the orographic uplift all augment rainstorm precipitation. The rainstorm area is corresponding to the cyclonic vortex column, with the vapor transported to the rainstorm area from Bay of Bengal through high-level southwesterly winds and lower northeasterly winds. There is a close relation between positive potential vorticity anomaly and the rainstorm.

**Key words:** major rainstorm, dynamical condition, water vapor, potential vorticity

## 引 言

新疆是有名的干旱、半干旱地区, 年平均降水量约 147 mm, 不到全国平均值的 1/4, 但暴雨造成的洪水和泥石流却是新疆的主要灾害之一, 如 1996 年 7 月的特大暴雨洪水、1998 年夏季天山两侧暴雨洪

水、1999 年夏季全疆大范围的暴雨加融雪型洪水, 均给新疆的国民经济和人民的生命财产造成了巨大损失, 其中“96.7”特大暴雨造成的直接经济损失就高达 48.28 亿元, 相当于当年新疆经济年产值的 7%<sup>[1]</sup>, 由于新疆发生暴雨是小概率事件, 因此对其的预报一直是个难题, 随着新疆的气候由暖干向暖湿的转变<sup>[2]</sup>, 暴雨出现的频率可能会增加, 暴雨带来

\* 公益性行业(气象)科研专项(GYHY201006012)、中央级科研院所基本科研业务费专项(IDM200802)和中国沙漠气象研究基金(Sqi2008004)共同资助

2011 年 6 月 15 日收稿; 2011 年 10 月 22 日收修定稿

第一作者: 陈春艳, 主要从事短期短时天气分析与预报技术研究. Email: chency357@sina.com

的洪涝也有可能比以往更加严重;另一方面,在高温干旱季节,暴雨则有助于降温和缓解旱情,利大于弊,无论从哪一方面来看,加强对新疆暴雨天气的分析研究都是十分必要的。

中国气象局规定的暴雨标准为日降水量  $R \geq 50$  mm,若按此标准,则新疆有 80% 以上的站从未有过暴雨<sup>[3]</sup>。根据多年的预报服务实践、暴雨洪水成灾事实和干旱半干旱地区暴雨特点,新疆气象、水文部门以日降水量  $R > 24$  mm 作为暴雨的标准。由于暴雨在新疆的重大影响,气象工作者对新疆暴雨的成因、分布规律等做了大量的研究<sup>[3-7]</sup>。构建了新疆大范围(尤其是天山山区及其两侧)暴雨天气过程的概念模型:100 hPa 南亚高压双体型、500 hPa 副热带大槽控制新疆的环流背景;三支气流的典型配置:200 hPa 西南急流、500 hPa 偏南气流、700 hPa 低空偏东急流。但是,7月16日18时至17日20时(北京时,下同),天山北坡的特大暴雨过程,500 hPa 偏南气流始终没有出现,究竟是什么机制造成了这次罕见的特大暴雨过程呢?文中应用 NCEP  $1^\circ \times 1^\circ$  再分析资料,计算了本次强暴雨过程中的水汽通量、位涡等物理参数,重点分析了天山北坡东段强暴雨突发时的空间结构以及这些物理参数的时空演变特征,认识暴雨形成的物理过程,以期提

高新疆暴雨预报准确率,减小灾害损失。

## 1 暴雨实况与天气形势特征

### 1.1 暴雨实况

2007年7月16—17日自塔里木盆地东南缘到天山山区中东部及其两侧、准葛尔盆地西北缘出现了一次强降水天气过程。其中,7月16日18时至17日20时,12站出现了暴雨(24小时降水量  $R > 24$  mm),6站日降水量超过 48.0 mm,主要降水区集中在天山北坡东段(乌鲁木齐经木垒到伊吾一线),奇台日降雨量 65.7 mm、吉木萨尔 59.0 mm,乌鲁木齐 58.6 mm,均突破了本站日最大降雨量极值。7月16日18时至17日14时,20小时内乌鲁木齐累计降水量达 75.8 mm,超过该站当月常年降水量的两倍多。16日14时降水开始于乌鲁木齐南部山区,18时乌鲁木齐城区降水开始,22时起天山北坡东段出现降水,17日01—07时出现第一个降水峰值,乌鲁木齐、天池等站相继出现了大于或接近每小时 10.0 mm 的强降水,08时之后降水强度有所减弱,10—13时又出现了一个次峰,14时之后降水陆续结束(图1)。

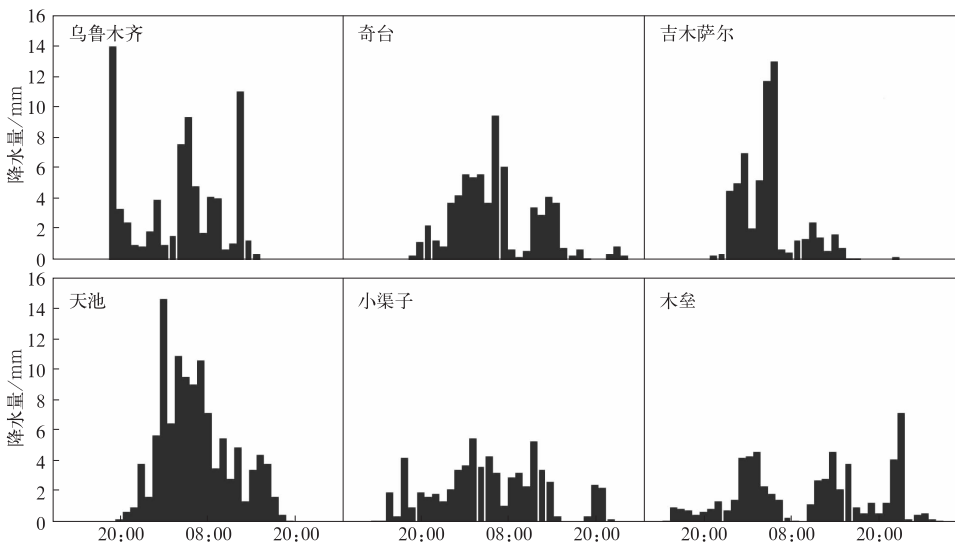


图 1 乌鲁木齐等六站 16 日 08 时至 18 日 08 时逐小时降水量(单位:mm)

Fig. 1 The hourly precipitation distributions at six stations from 08 BT 16 July to 08 BT 18 July 2007 (unit: mm)

从每小时降水量演变(图1)可以看到中尺度对流系统的活动情况,乌鲁木齐16日18—19时降水量达 13.9 mm,之后降水强度减弱,17日03—04时

突增至 7.5 mm,04—05时又增至 9.3 mm,之后再度减弱,11—12时又猛增至 10.9 mm,再减弱,14时降水结束。16日18—19时逐分钟降水量演变具

有较大的跳跃性且最大分钟降水量达 1.6 mm, 对应时次的雷达资料显示中小尺度对流云团异常活跃; 但 17 日 11—12 时逐分钟降水量变化不大且最大值仅为 0.4 mm。由此看来新疆虽位于半干旱地区, 但在有利的大尺度环流背景下, 活跃的中小尺度系统导致了暴雨的发生。

## 1.2 天气形势特征

100 hPa(图 2a) 南亚高压加强东扩过程中, 在

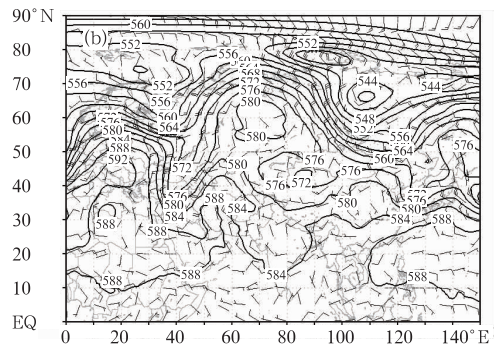
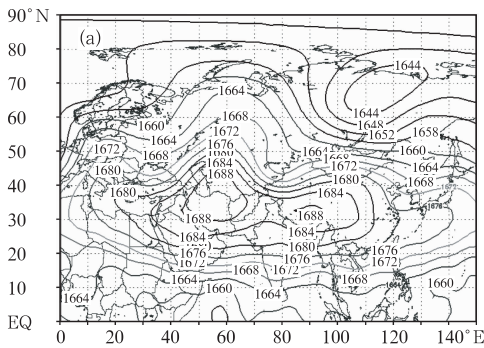


图 2 2007 年 7 月 16 日 20 时 100 hPa(a) 和 500 hPa(b) 高度场(单位: dagpm)

Fig. 2 The geopotential height fields of 100 hPa (a) and 500 hPa (b) at 20 BT 16 July 2007 (unit: dagpm)

暴雨天气来临前, 500 hPa(图略) 欧亚范围内中高纬度为两槽一脊型, 北欧与泰米尔为低压槽区, 乌拉尔山北部为阻塞高压脊区。中低纬为两脊两槽型, 南欧与伊朗为副高脊区, 黑海与巴尔喀什湖为低槽活动区。随着美洲环流经向度的加大, 大西洋中部脊发展东部槽加深, 能量频散作用导致欧亚范围内环流经向度加大, 南欧脊发展东移, 黑海槽加深, 里海地区暖平流发展, 促使伊朗至里海脊发展中与乌拉尔山阻塞高压部分结合, 乌拉尔阻塞高压加强, 15 日 20 时出现两根等值线的闭合中心, 中心值达到 584 dagpm, 在其东南侧形成了东北偏东气流, 16 日 20 时(图 2b), 随着阻塞高压的东伸, 新疆北部转为一致的偏东气流。

15 日 20 时受里海脊向北发展的影响, 位于乌拉尔山南部的威海至巴尔喀什湖低涡东移到巴尔喀什湖附近, 继而受乌拉尔阻高向东南扩展的强迫作用, 16 日 08 时该低涡开始东南移, 与此同时伊朗副高分裂正变高东移使印度到南疆的中亚槽填塞减弱, 天山南坡由偏南风转为偏西风, 且风速不断加大, 天山南侧西风带开始建立, 受西风带影响, 巴尔喀什湖低涡南下到天山南侧轮台附近时, 在残留弱

伊朗高原附近形成一个闭合高中心, 且不断加强北抬, 与此同时, 在青藏高原东侧形成另一个高中心, 新疆处在两闭合中心之间的长波槽控制之中。暴雨天气发生在南亚高压双体型(出现东、西两个闭合高中心) 的背景下<sup>[1,3,5]</sup>, 且西部强于东部, 中高纬为两槽一脊型, 北欧与巴尔喀什湖为超长波槽区, 乌拉尔山为长波脊区, 中纬槽脊系统与中低纬系统同位相叠加, 使得环流经向度加大, 且稳定维持, 为暴雨过程提供了大尺度的环流背景。

南风的引导下转向东北移, 越过天山, 该低涡(中亚低涡) 在天山北坡东段维持, 与此同时, 天山北侧偏东气流与天山南侧偏西气流形成沿天山两侧的东风强切变, 造成了天山北坡东段罕见的特大暴雨过程。

这次特大暴雨过程中随着 100 hPa 南亚高压双体型的建立, 使得 500 hPa 环流经向度和暴雨影响系统得以长时间维持; 南亚高压西部强中心对应伊朗副热带高压北抬与乌拉尔山高压脊叠加, 建立阻塞形势, 致使新疆北部出现偏东气流; 南亚高压东部中心对应西太平洋副热带高压西伸北抬, 起到阻挡作用, 使中亚低涡在天山北坡东段移速缓慢; 中亚低涡和沿天山两侧的强东西风切变是本次暴雨过程的影响系统。

## 2 特大暴雨成因分析

### 2.1 大气层结与对流发展分析

这次暴雨过程中, 多数时段大气层结都比较稳定, 其不稳定的大气层结不明显, 大气的对流性抬升

不显著。从7月16日与17日08时的探空曲线来看,仅16日20时对流有效位能(CAPE)为 $84.7 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,其余时次几乎为零。由于午后太阳辐射增温,大气层结表现出一定的不稳定性,较有利于中尺度对流系统的发展,因而降水过程中出现较显著的对流性降水特征。16日20时沿乌鲁木齐所在 $87^\circ\text{E}$ 假相当位温及比湿经向剖面显示(图3a),

在 $900\sim 700 \text{ hPa}$ 附近表现出弱的不稳定层结,且乌鲁木齐所在位置为比湿大值区,比湿达 $1.2 \times 10^{-2} \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,其底层增湿明显。此次暴雨天气过程发生在弱不稳定区域存在增湿区,这种温湿场的分布结构,在一定程度上加强了大气层结的不稳定性,有利于降水的发生。

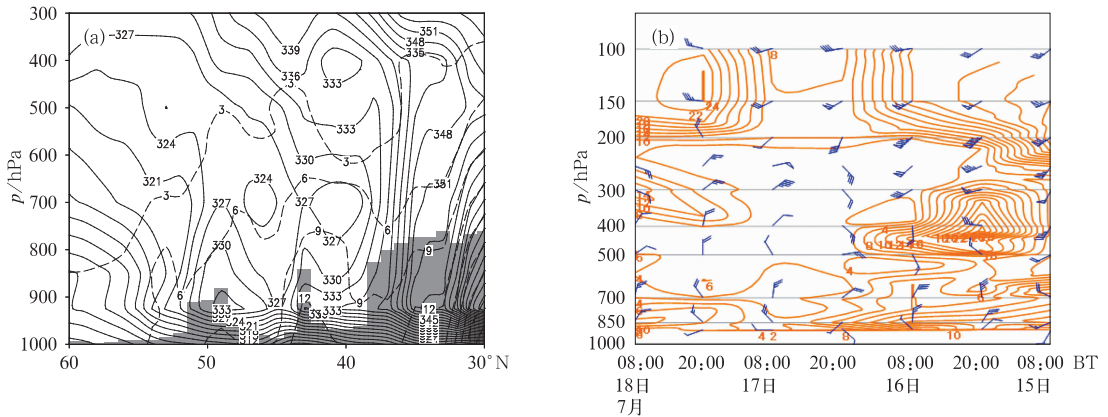


图3 2007年7月16日20时沿 $87^\circ\text{E}$ 假相当位温(实线,单位: $\text{K}$ ) and 比湿(虚线,单位: $10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) 经向剖面图(阴影代表地形)(a)和2007年7月15—18日乌鲁木齐所在位置( $43.5^\circ\text{N}$ 、 $87.4^\circ\text{E}$ ) 水平风场和温度露点差(单位: $^\circ\text{C}$ )的时间-高度演变(b)

Fig. 3 Meridional cross section along  $87^\circ\text{E}$  of the pseudo-potential temperature (solid lines, unit:  $\text{K}$ ) and specific humidity (dashed lines, unit:  $10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) at 20:00 BT 16 July 2007 (the shaded denotes the topography)(a), and the time-height evolution of the horizontal wind field and dew point deficit (unit:  $^\circ\text{C}$ ) over Urumqi ( $43.5^\circ\text{N}$ ,  $87.4^\circ\text{E}$ ) during 15—18 July 2007 (b)

沿乌鲁木齐所在位置的温度露点差和实测风场的时间-高度演变图(图3b)表明,7月15日20时后,对流层中上层为西南风,出现了明显湿度大值区。16日08时对流层中高层转为偏南风。随后 $850\sim 200 \text{ hPa}$ 风场转为一致的偏东风,湿层也明显向下扩展,此时也是降水开始的时段。随着强降水的发展,整层湿度增大趋于饱和,温度露点差 $\leq 5^\circ\text{C}$ 。由此看来,偏东气流的水汽输送对天山北坡暴雨起到了重要作用。

天山北坡暴雨过程的温湿场分布表明:气团具有一定的潜在不稳定特征,且不同降水时段稳定性特征有所不同,表明热力强迫对暴雨加强有一定的作用。

## 2.2 水汽源地与水汽输送分析

新疆属于半干旱地区,水汽源地始终是暴雨过程的关键问题,多年的预报经验表明:主汛期暴雨过程与中亚副热带大槽密切相关,槽前西南气流是暴雨过程中水汽接力输送的主要通道,再由合适的天

气系统携带北上的水汽进入暴雨区。

### 2.2.1 水汽源地及其输送

经过对16日20时至17日20时暴雨发生时各时次整层( $1000\sim 300 \text{ hPa}$ )垂直积分的水汽通量(图4)分析发现,和西南地区的暴雨过程类似<sup>[8]</sup>,本次强暴雨过程的水汽主要源于孟加拉湾,经夏季青

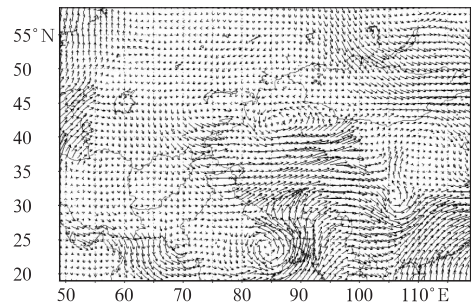


图4 2007年7月16日20时整层水汽通量(单位: $\text{g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1}$ )

Fig. 4 The water-vapor flux in whole level at 20 BT 16 July 2007 (unit:  $\text{g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1}$ )

藏高原热低压东侧的偏南气流向北输送,与位于新疆的中亚槽前西南气流汇合,通过西南气流接力输送并入到东南移的中亚低涡中,有一部分接力输送到河西走廊,再由 500 hPa 及其以下的东南气流向北输送,由于受到西西伯利亚阻塞高压的强迫在北塔山站附近转向为东北气流,将暖湿气流卷入暴雨区。17 日 20 时随着伊朗副高的北挺,威海到巴尔喀什湖脊与西西伯利亚阻高再次打通,中亚低涡快速减弱东移,高层西南急流和中低层偏东气流两个水汽输送通道也随之消失,天山北坡东段的强降水也宣告结束。

### 2.2.2 暴雨区水汽收支分析

对暴雨区( $42^{\circ}\sim 45^{\circ}\text{N}$ ,  $87^{\circ}\sim 92^{\circ}\text{E}$ )计算 16 日 20 时水汽收支,计算结果如表 1(正值为流入,负值为流出)显示,各层不同方向上水汽输送存在明显差异,与黄淮和长江等流域内陆地区不同<sup>[9-12]</sup>,850 hPa 水汽收支的东、西、北边界有一定的参考价值,受东西走向天山大地形的影响,850 hPa 南边界和 700 hPa 南边界仅做  $u$ 、 $v$  分量的参考,不存在水汽收支。水汽输送以 700 hPa 东北气流的偏北分量为主,其次是 500 hPa 西南气流的偏南输送,东、西边界以流出为主。综观水汽通量收支,呈现经向辐合,纬向辐散的特征。就区域整层水汽收支而言,北边界水汽输入略大于南边界,西边界低层 850 hPa 流入,700 hPa 及以上为流出,整个区域水汽收支为水汽汇区。

表 1 2007 年 7 月 16 日 20 时  $42^{\circ}\sim 45^{\circ}\text{N}$ 、 $87^{\circ}\sim 92^{\circ}\text{E}$  水汽收支 (单位:  $10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{m}^{-1}$ )

Table 1 The incoming and outgoing of water vapour at 20 BT 16 July 2007 within area of  $42^{\circ}\sim 45^{\circ}\text{N}$ ,  $87^{\circ}\sim 92^{\circ}\text{E}$  (unit:  $10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{m}^{-1}$ )

层次	西边界	东边界	南边界	北边界	合计
300 hPa	-0.6	0.0	0.8	0.3	0.5
500 hPa	-1.7	-0.5	4.4	3.6	5.8
700 hPa	-2.2	-4.9	-8.5	7.4	0.2
850 hPa	1.9	-0.5	1.4	-7.8	-5.9
整层	-2.6	-5.4	5.2	3.5	0.6

### 2.2.3 水汽的迅速辐合集中

分析暴雨期间逐层水汽通量散度(图略)发现 850~700 hPa 水汽辐合大值区与暴雨落区十分吻合。沿暴雨中心乌鲁木齐做 7 月 15 日 00 时到 17 日 20 时水汽通量散度剖面图(图 5),可以看出对流层中层在 15 日 20 时之后转为水汽辐合,随着水汽通量的偏东分量加大,16 日 20 时在 700 hPa 附近水汽通量散度达到了最小值,出现强水汽辐合,辐合

中心值为  $-35 \times 10^{-5} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1}$ ,这与乌鲁木齐每小时 13.9 mm 的强降水相对应。之后水汽通量散度负值中心向中低层传播,中心值下降到  $-25 \times 10^{-5} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1}$ ,高度在 850~750 hPa 之间。17 日 14 时水汽输送减弱,降水也趋于减弱。暴雨期间水汽辐合始终维持在  $-20 \times 10^{-5} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1}$  以下,当达到或接近这一临界值时暴雨开始,辐合中心低于它时降水结束。

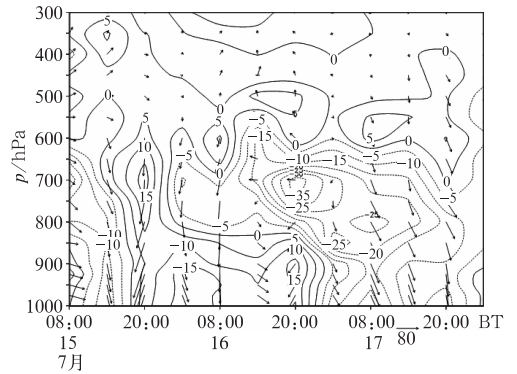


图 5 7 月 15—17 日乌鲁木齐( $43^{\circ}\text{N}$ ,  $87^{\circ}\text{E}$ )水汽通量随时间垂直剖面图

(单位:  $10^{-5} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1}$ )

Fig. 5 The height-time section of water vapor flux over Urumqi ( $43^{\circ}\text{N}$ ,  $87^{\circ}\text{E}$ ) from 15 July to 17 July 2007

(unit:  $10^{-5} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1}$ )

### 2.3 高低空急流配置对暴雨过程的作用

沿  $87^{\circ}\text{E}$  经线做  $u$  分量、垂直速度的垂直剖面图(图 6),从 16 日 20 时开始,  $43^{\circ}\text{N}$ (天山山区分水岭的位置)以北为东风带,以南为西风带,出现了沿天山两侧的东西风强切变。东风带  $\geq 5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  的风速区由 700 hPa 垂直伸展到 300 hPa 以上,  $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  的最大风速区出现在 600 hPa 附近。西风带无论从强度和范围上均强于东风带,  $\geq 10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  的风速区由 700 hPa 垂直伸展到 200 hPa 以上,最大风速区出现在 200 hPa 附近,极大风速超过  $30 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,是 200 hPa 西风急流轴的位置所在。700 hPa 高度正好与天山海拔高度相仿,在此之上形成如此深厚、强度较强的强东西风切变为暴雨区持续的辐合上升运动的维持提供了强有力的支持。强上升运动区出现在东风带的南侧,  $3 \times 10^{-3} \text{ hPa} \cdot \text{s}^{-1}$  的上升运动大值区从低层一直伸展到 300 hPa 以上,出现了两个上升运动大值中心,一个在上部 600~300 hPa,中心最大达  $6 \times 10^{-3} \text{ hPa} \cdot \text{s}^{-1}$ ,与强切变对应<sup>[13]</sup>,另一个在 800 hPa 附近,中心最大值达  $5 \times 10^{-3} \text{ hPa} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

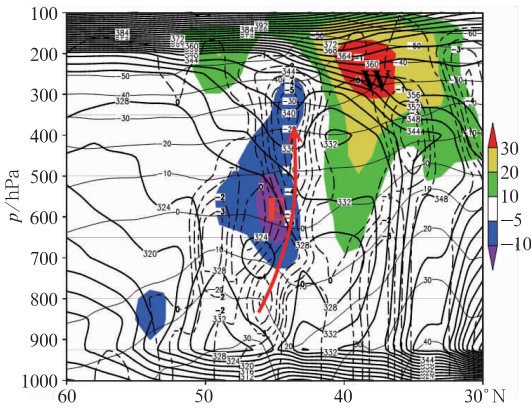


图 6 2007 年 7 月 16 日 20 时沿 87°E  $u$ 、 $w$ 、 $\theta$  垂直剖面

(阴影区为东西风带,粗实线为假相当位温(单位:K),细实线为温度(单位:℃),虚线为上升运动区(单位: $10^{-3} \text{ hPa} \cdot \text{s}^{-1}$ ))

Fig. 6 The vertical section of zonal wind, vertical velocity and  $\theta$  at 20 BT 16 July 2007 (Shadow area is zonal wind in  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ , heavy line is  $\theta$  in K, thin line is temperature in  $^{\circ}\text{C}$ , dotted line is ascending motion in  $10^{-3} \text{ hPa} \cdot \text{s}^{-1}$ )

图 7 给出了强暴雨开始前到结束时(16 日 20 时至 17 日 14 时)沿 44°N 暴雨中心的纬向垂直环流,16 日 20 时在 86°~93°E 一支来自东部较深厚的低空偏东气流沿天山北坡爬升,与东移的 500 hPa 上的上升气流和气旋性扰动合并,在 300 hPa 附近转向与 200 hPa 西南急流汇合,在高空西南急流出口区的左侧,低空偏东急流的出口区南侧范围内,出现一个强上升运动区。强降雨出现在该上升运动区中,即低涡切变线的东侧。17 日 02 时,低空偏东急流维持,强上升运动区东扩,暴雨区 87°~93°E 范围内上升运动伸展到 300 hPa 以上,且强度增强,与第一个强降雨峰值对应。17 日 08 时,低空偏东急流开始减弱,强上升运动区已东移至 90°E 附近,强度有所减弱。至 17 日 14 时低空偏东气流减弱,上升运动区东移,降水区随之东移。

沿 87°E 经向垂直环流(图略),7 月 16 日 20 时高纬的东北气流(高度已达 500 hPa)从 46°~50°N 倾斜上升并向南在 42°N 附近与北上的西南急流交汇,强烈激发了上升运动,强上升运动区出现在

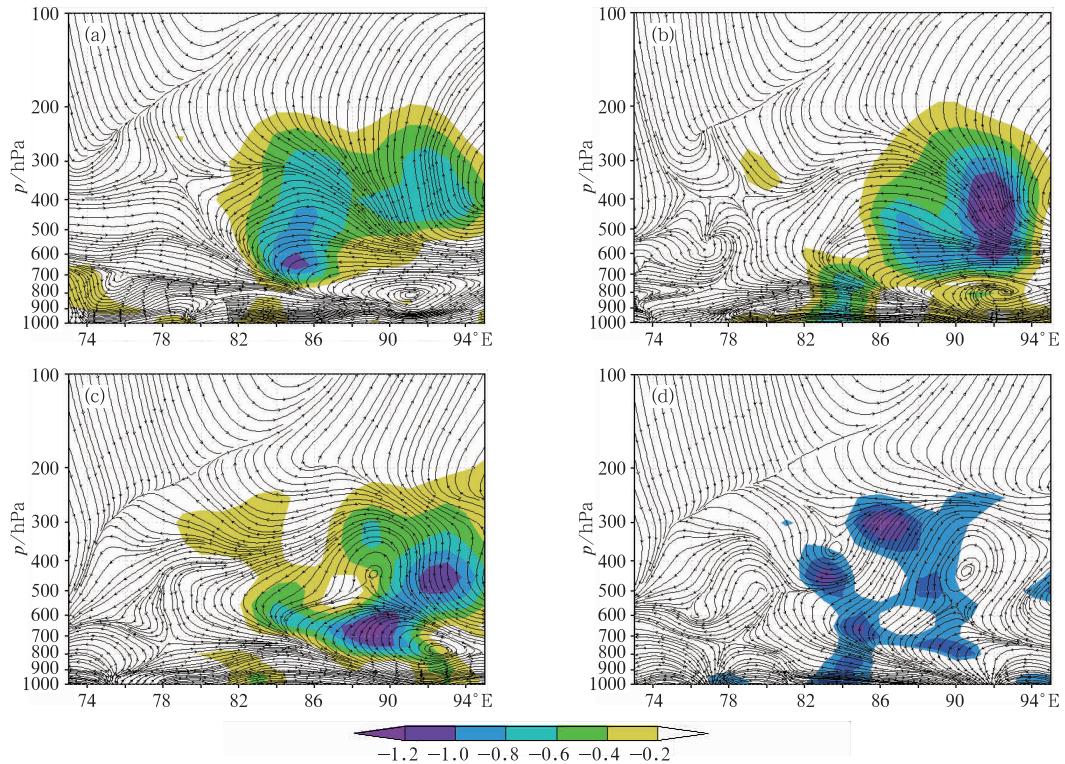


图 7 2007 年 7 月 16 日 20 时至 17 日 14 时沿 44°N 暴雨区纬向垂直环流图(阴影区为垂直速度)  
(a)16 日 20 时, (b)17 时 02 时, (c)17 日 08 时, (d)17 日 14 时

Fig. 7 The zonal vertical circulations over rainstorm area along 44°N(shadow area is vertical velocity)  
(a) 20 BT 16, (b) 02 BT 17, (c) 08 BT 17, and (d) 14 BT 17 July 2007

42°~45°N 上空的 200 hPa 以下层。特大暴雨发生在低空急流南侧、高空急流北侧中低层暖湿气流辐合、高层辐散的上升运动区中。17 日 20 时,伴随低涡切变线减弱东移,南北风辐合消失,降水也迅速减弱。

分析 16 日 20 时 200、700 hPa 散度和流场叠加图(图略)发现,高空西南急流出口区左侧辐散,低空急流较弱,在其南侧有低层辐合。沿 43°N 分别做 16 日 20 时纬向涡度、散度和垂直速度垂直剖面图(图略),气旋性涡柱是一低层辐合、高层辐散的垂直上升气柱;暴雨区对应中低层辐合、高层辐散、正涡度中心,散度场的垂直结构变化不仅有利于涡旋内上空抽吸作用的加强,而且有利于上升运动的增强,

为降水提供有利的动力条件。

分析 7 月 15—17 日(40°~45°N、85°~90°E)区域平均的涡度、散度随时间变化图(图 8),正涡度在暴雨出现前 12 小时开始出现,随着低涡的移入和高层西南急流的建立,850~200 hPa 整层为正涡度区,大值区出现在 200 hPa,中心最大值达到  $11 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ,出现时间与暴雨过程的第一个强降雨峰值对应,正涡度减小到一半时降水强度开始减弱并趋于结束,高层 200 hPa 正涡度减小晚于中低层。降水开始前 12 小时,低层 850 hPa 有辐合,高层 200 hPa 有辐散,16 日 20 时,200 hPa 辐散快速增强到  $25 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ,从低层到 300 hPa 出现辐合,与深厚的垂直运动相对应,特大暴雨过程开始。

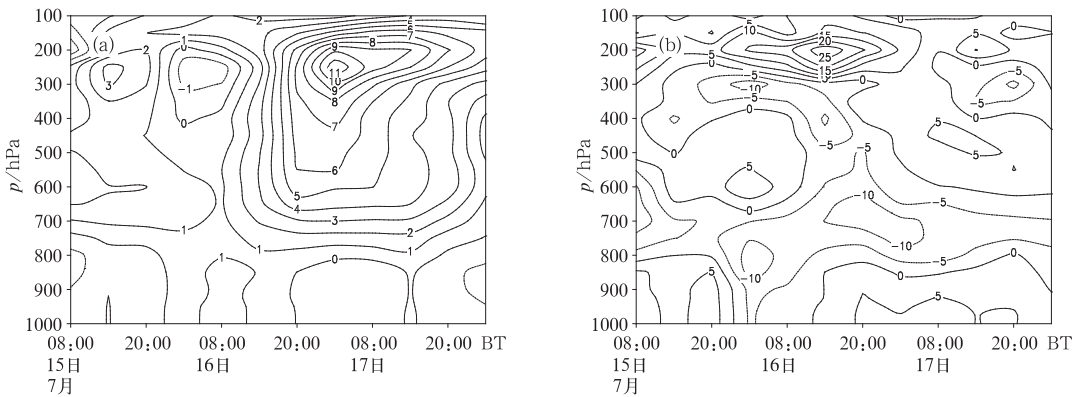


图 8 2007 年 7 月 15—17 日区域平均(40°~45°N、85°~90°E)的涡度(a)、散度(b)随时间变化(单位:  $10^{-5} \text{ s}^{-1}$ )

Fig. 8 The time variable data of region averaging vorticity (a) and divergence (b) from 15 to 17 July 2007(40°~45°N, 85°~90°E)(unit:  $10^{-5} \text{ s}^{-1}$ )

## 2.4 地形对对流发展、暴雨形成的影响

本次过程暴雨落区均出现在天山北坡,乌鲁木齐、天池等站还出现了极端暴雨,地形因素不容忽视。以距特大暴雨中心天池站最近的乌鲁木齐站(出现了大暴雨)探空资料分别做 15—17 日  $u$ 、 $v$ 、 $\omega$  分量的时间垂直剖面图(图略),东风大值出现后迅速向高层传播的时间与暴雨出现几乎同时,说明强切变的建立组织了较强的系统性抬升运动,为特大暴雨过程提供了深厚的上升运动,同时中低层偏东气流也是重要的水汽接力输送通道,随着东风带的减弱,上升运动减弱,暴雨过程结束。 $v$  分量的时间演变显示,暴雨过程开始前,600 hPa 及其以下为北风,暴雨期间北风带的高度仍维持在 600 hPa 及其以下,但风速明显增大,暴雨区位于天山北坡东段乌

鲁木齐到木垒之间,强降水中心乌鲁木齐、天池等地还有向北开口的喇叭口地形,较强的偏北气流有利于低层地形辐合抬升,向山的偏北气流触发了暴雨过程的初始扰动抬升,为暴雨过程提供了初始的上升运动,17 日 08 时开始北风带迅速增大并开始向高层传播,北风带增大初期酝酿了第二个强降雨峰值,随着北风带向高层传播,17 日 20 时北风大值中心达 500 hPa,表明低值系统已东移,乌鲁木齐、天池等暴雨区已位于低涡后部,降水结束。

## 2.5 位涡分析

位涡是能够综合反映大气动力学和热力特征的物理量<sup>[14-16]</sup>。做 15—17 日暴雨区中心(43°N、87°E)位涡随时间垂直演变图,降水开始前高位涡集中在 300 hPa 及其以上层次,阻塞高压南侧高层的

干冷空气侵入表现为一个正位涡异常,16 日开始,1.0 PVU 的高位涡舌向对流层中层下传,正位涡异常表示触发暴雨的干冷空气沿西北路径向中低层侵入,通过改变中低层温度场,使得中低层斜压性增强,导致对流层中下层风切变加强,有利于低涡发展维持。杨贵名等<sup>[17]</sup>对黄淮气旋干冷侵入的研究也证实了这一点。

沿 43°N 分别做 15 日 20 时、16 日 20 时位涡

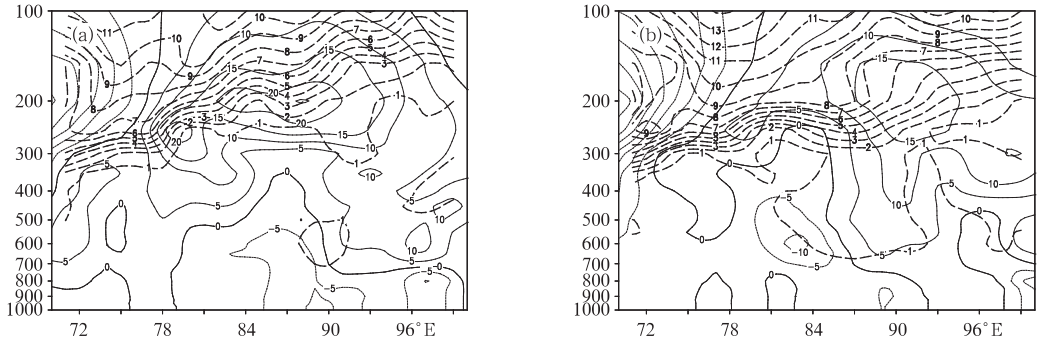


图 9 15 日 20 时(a)、16 日 20 时(b)沿 43°N 位涡(长虚线,单位:  $10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{K} \cdot \text{kg}^{-1}$ )和  $v$  分量(实线:南风, 点线:北风, 单位:  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )的垂直剖面

Fig. 9 The vertical sections of potential vorticity (unit:  $10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{K} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) and meridional wind (unit:  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ) along 43°N at (a) 20 BT 15 July and (b) 20 BT 16 July 2007

### 3 引发天山北坡特大暴雨的天气过程概念模型

综上所述,给出本次天山北坡特大暴雨天气过程的概念模型(图 10):100 hPa 南亚高压出现东西两个闭合中心,双体型快速建立,200 hPa 西南急流维持在新疆中部;500 hPa 环流经向发展,高层干冷空气侵入导致中亚低涡稳定维持在天山北坡东段,500 hPa 西西伯利亚阻塞高压前部东北风与天山南侧西风强切变的维持给暴雨区提供了持续稳定的辐合上升运动,低层天山北侧的北风分量与向北开口的有利地形加剧了暴雨区的辐合上升,暴雨区为低层辐合、高层辐散的气旋性涡柱,是一垂直上升气柱;孟加拉湾北上的水汽通过 500 hPa 中亚副热带大槽前的西西南暖湿气流接力输送到中亚低值系统中,700 hPa 及其以下的东北暖湿气流将孟加拉湾北上到河西走廊的水汽接力输送至暴雨区,低空暖湿气流的汇入同时增强了气团的潜在不稳定,有利于对流系统的发展和降水的发生。

(长虚线)和  $v$  分量(实线:南风;点线:北风)的垂直剖面分析(图 9),随着低涡的东移,高层的高位涡舌向下伸展,导致 87°~90°E 上空 700 hPa 北风风速由  $5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  加大到  $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,垂直高度也伸展到了 500 hPa 以上,与此同时,84°E 附近南风明显增强,由此看来,高层适度干冷侵入是中低层低涡系统的发展和维持的重要原因之一,低涡的长时间维持是该次降水过程长时间维持的重要天气尺度原因。

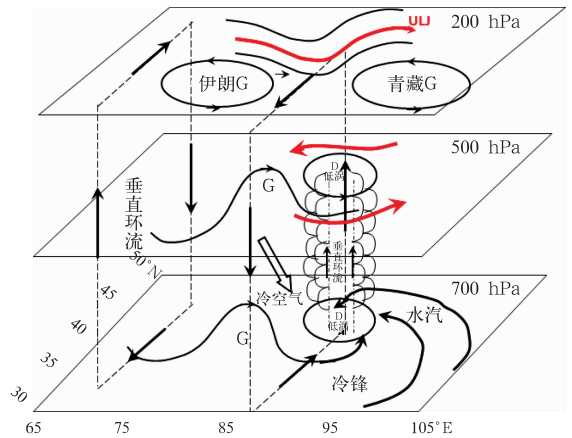


图 10 天山北坡特大暴雨天气过程概念模型图  
Fig. 10 The conceptual model of extraordinary rainstorm over north slope of Tianshan Mountains

### 4 结语

(1) 本次特大暴雨天气过程发生在南亚高压双体型,且西部强于东部的环流背景下,和以往不同,巴尔喀什湖低压受里海脊和西西伯利亚阻塞高压的共同强迫,变形为长条状,其中伴随有一条闭合等值



线的中亚低值系统先东南下到天山南侧轮台附近,得到南支扰动的补充,后受天山北侧西风气流的强迫和残留弱南风引导东北移到天山北坡东段并维持,造成了天山北坡东段罕见的特大暴雨过程。

(2) 西西伯利亚阻塞高压前部的偏北风和天山南侧西风的深厚切变为本次特大暴雨过程提供了持续的动力条件,低层的偏北风和天山北坡向北开口的喇叭口地形也使暴雨强度增大,特大暴雨区对应东西风与南北风的辐合上升区。

(3) 阻塞高压南侧高层的干冷空气侵入表现为一个正位涡异常,通过改变中低层温度场,使得中低层斜压性增强,导致对流层中低层风切变加强,有利于气旋加深。正涡度平流和暖平流先于强降水发生,暴雨区对应高层辐散低层辐合的气旋性涡柱。

(4) 本次特大暴雨的水汽源自孟加拉湾,由夏季青藏高原上热低压东侧的偏南气流向北输送,再由暴雨天气系统接力输送到暴雨区,水汽输送主要以对流层中上层的西西南气流和 700 hPa 东北气流两条通道为主。

对于这次特大暴雨过程 ECMWF 和 T213 均预报出了巴尔喀什湖低涡东南移,进入天山南侧之后东北上,并且在天山北坡停留,沿天山两侧有东西风的切变存在,但由于预报员缺乏对此类特大暴雨个例的认识没有预报出特大暴雨,与日本、T213 模式的降水预报产品表现类似:预报大到暴雨出现在乌鲁木齐附近的天山山区;德国降水预报在木垒到巴里坤预报了特大暴雨,参考价值最大。在有利的环流背景下,500 hPa 闭合低值系统和强切变的组合较偏南气流更有利于出现极值降水,正涡度平流和暖平流较特大暴雨过程有 12 小时的提前量,有较好的预报指示意义,低层有利于地形抬升的风场的出现和维持可以诊断暴雨开始和持续时间。

## 参考文献

- [1] 徐羹慧. “96·7”新疆特大暴雨洪水预报服务技术研究的综述与启示[J]//“96·7”特大暴雨专辑. 新疆气象,1997,20(1): 1-5.
- [2] 施雅风. 中国西北气候由暖干向暖湿转型问题评估[M]. 北京:气象出版社,2003.
- [3] 张家宝,邓子凤. 新疆降水概论[M]. 北京:气象出版社,1987.
- [4] 胡汝骥,姜逢青,王亚俊,等. 新疆气候由暖干向暖湿转变的信号及影响[J]. 干旱区地理,2002,25(3): 194-200.
- [5] 张家宝主编. 新疆短期天气预报指导手册[M]. 乌鲁木齐:新疆人民出版社,1986.
- [6] 马淑红,席元伟. 新疆暴雨的若干规律性[M]. 气象学报,1997,55(2): 239-248.
- [7] 杨涛,杨莲梅. 新疆强对流暴雨的气候特征和概率分布模式研究[J]. 灾害学,2003,18(1): 47-52.
- [8] 尤红,肖子牛,王曼,等. 2008年702滇中大暴雨成因诊断和数值模拟[J]. 气象,2010,36(1): 7-16.
- [9] 杨克明,林健,康志明,等. 2004年7月黄淮特大暴雨的天气动力学分析[J]. 高原气象,2006,25(5): 781-791.
- [10] 张瑞禹,王明欢,陈波. 2008年8月末湖北连续大暴雨的水汽特征分析[J]. 气象,2010,36(2): 48-53.
- [11] 王晓芳,黄华丽,黄治勇. 2010年5—6月南方持续性暴雨的成因分析[J]. 气象,2011,37(10): 1206-1215.
- [12] 林建. 2009年8月29日黄淮和西南地区不同性质暴雨特征分析[J]. 气象,2011,37(3): 276-284.
- [13] 朱乾根,林锦瑞,唐东升. 天气学原理和方法[M]. 北京:气象出版社,2007.
- [14] 陆尔,丁一汇. 1991年江淮特大暴雨的位涡分析与冷空气活动[J]. 应用气象学报,1994,5(3): 266-274.
- [15] 寿绍文. 位涡理论及其应用[J]. 气象,2010,36(3): 9-18.
- [16] 陶祖钰. 基础理论与预报实践[J]. 气象,2011,37(2): 129-135.
- [17] 杨贵名,毛冬艳,姚秀萍. “强降水和黄淮气旋”中的干侵入分析. 高原气象,2006,35(1): 16-28.