

张云惠,李海燕,蔺喜禄,等. 2015. 南疆西部持续性暴雨环流背景及天气尺度的动力过程分析. 气象, 41(7):816-824.

# 南疆西部持续性暴雨环流背景及 天气尺度的动力过程分析<sup>\*1</sup>

张云惠<sup>1</sup> 李海燕<sup>1</sup> 蔺喜禄<sup>2</sup> 阿不力米提<sup>1</sup> 于碧馨<sup>1</sup>

1 新疆气象台, 乌鲁木齐 830002

2 93886 部队气象中心, 乌鲁木齐 830000

**提 要:** 2013 年 6 月 14—19 日南疆西部出现了持续性暴雨, 使用常规观测资料和 NCEP 再分析资料在讨论环境大气湿度条件与暴雨关系的基础上, 分析了水汽远距离输送到新疆并在南疆上空积累的天气尺度动力过程及其形成的原因。结果表明, 暴雨产生在大气异常潮湿的环境中, 强降雨时段对流层低层比湿最大值达到  $16\sim 18\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。长时间强降水的重要原因是边界层以上高湿的特征在暴雨产生过程中一直维持, 充沛的水汽被一支从阿拉伯海和孟加拉湾的偏南气流向北输送, 偏南风持续增速加大了水汽的输送。同时, 随着偏南气流向北靠近新疆, 对流层低层偏东急流在南疆西部产生强的水汽通量辐合, 使得高空强烈辐散与低空辐合之间的耦合不断加强, 不仅增加了低层水汽在暴雨区汇集, 也通过增强垂直速度将更多的潮湿空气向上输送, 使高层大气湿度增加。暴雨的日变化与阿克苏南部中尺度垂直环流圈的间断性建立及低层偏东急流在夜间增强有关。

**关键词:** 暴雨, 环流背景, 水汽输送, 动力机制

**中图分类号:** P433, P458

**文献标志码:** A

**doi:** 10.7519/j.issn.1000-0526.2015.07.003

## Analysis of Continuous Rainstorm Circulation Background and the Dynamic Process of Synoptic-Scale in West of Southern Xinjiang

ZHANG Yunhui<sup>1</sup> LI Haiyan<sup>1</sup> LIN Xilu<sup>2</sup> Abulimiti<sup>1</sup> YU Bixin<sup>1</sup>

1 Xinjiang Meteorological Observatory, Urumqi 830002

2 Unit of 93886 of People's Liberation Army, Urumqi 830000

**Abstract:** The continuous rainstorm appeared in West of Southern Xinjiang from 14 to 19 June 2013. The convention observation, T639, NCEP reanalysis data are used in the analysis in order to know why the rainfall could be so much. Based on the relation between environmental air humidity conditions and the rainstorm, this paper analyzed the weather scale dynamic process and its forming reasons why the water vapor was transmitted over a long distance to Xinjiang, getting accumulated over the West of Southern Xinjiang. The results showed that rainstorm develops in an abnormal environment. During heavy rainfalls the top value of specific humidity reaches to  $16\sim 18\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$  in the lower troposphere. The extreme humid situation maintains even though the heavy rain appears, which is favorable for the long-lasting severe rainstorm. The abundant water vapor is transported from Arabian Sea and Bay of Bengal to West of Southern Xinjiang by a southern flow. The southern wind increased the water vapor transfer. At the same time, with the southern airflow's approaching Xinjiang, strong water vapor flux convergence is generated by low-level troposphere eastern jet stream in West of Southern Xinjiang, making the strong couple between

\* 国家科技支撑计划项目(2012BAC23B01)、中国沙漠气象科学研究基金(Sqj2012004)和中国气象局预报员专项(CAMYBY2014-080)共同资助

2014 年 6 月 12 日收稿; 2015 年 4 月 13 日收修定稿

第一作者:张云惠,主要从事天气预报业务及研究. Email:715208285@qq.com

upper-level divergence and low-level convergence of vapor lower, and also strengthening the ascending velocity and inducing more wet air to higher altitude and then thickening the moisture layer further. The diurnal variation of the heavy rain is related to the vertical discontinuity of mesoscale circulation circle in Aksu southern and the low-level easterly jet enhancements at night.

**Key words:** rainstorm, circulation background, water vapor transmission, dynamic mechanism

## 引言

由于受季风气候及地理位置和地形的影响,我国暴雨多发且暴雨的形成有显著的地域特点(陶诗言,1980)。在全球气候变暖大气候背景下,近10年我国暴雨日数总体呈增加趋势,暴雨出现的时段较以往更长(林建等,2014)。多年来气象专家对不同地区的暴雨形成机制做了大量研究,在暴雨强度、落区预报方面总结了很多宝贵的经验(陈春艳等,2012;柯文华等,2012;梁生俊等,2012;孙军等,2012;孙兴池等,2012;2015;王伏村等,2014;王晓芳等,2011;井喜等,2014)。新疆暴雨虽是小概率事件,但近10年新疆西部暴雨灾害呈明显增加趋势(杨霞等,2011;张云惠等,2013),且一次暴雨过程降水量可以超过其年均降水量,甚至能改变气候值。由于新疆西部三面环山向东开口的特殊地形,大降水落区预报一直是难点,不少学者对新疆西部大降水统计研究(江远安等,2001;刘皑国等,2005;张家宝等,1986;张云惠等,2013)表明,中亚低涡(槽)是造成新疆西部大降水的主要影响系统,低空偏东急流起重要作用;对新疆西部暴雨个例研究(黄艳等,2012;刘海涛等,2013;张云惠等,2009)表明,高、中及低空三支气流的有利配置,中小尺度辐合与对流是暴雨产生的直接原因;杨莲梅等(2003)和张俊岚等(2009)研究指出:阿拉伯海和孟加拉湾的水汽通过接力方式可以影响到新疆,从而产生大降水甚至暴雨。

持续暴雨产生的前提条件是要有异常丰沛的水汽,那么,新疆西部暴雨的水汽是从哪里、以何种方式被输送到新疆?水汽输送条件是如何建立?水汽辐合究竟达到怎样的程度?这些都是新疆西部暴雨研究值得探讨的重要科学问题。本文在大环流背景基础上,针对上述天气尺度的相关问题进行研究,揭示2013年6月新疆西部暴雨产生过程中有直接关系的重要天气尺度动力过程及其在形成暴雨过程中所起的重要作用。

## 1 天气实况及资料

6月14—19日08时(北京时,下同),受北方冷空气和西南暖湿气流的共同影响,新疆大部出现了一次强降水过程,新疆中西部地区出现大到暴雨,强降雨时段主要集中在15日夜間到17日夜間,累积降水量达30~100 mm(见图1)。暴雨中心温宿累计雨量99.8 mm,超过历年平均降水量(83.9 mm),16日08时至17日08时日降水量67.3 mm,破有气象记录以来降水极值;暴雨期间1 h雨强:柯坪27.6 mm、温宿25.7 mm,阿克苏18.9 mm。236站累计雨量达到暴雨(>24 mm),72站达到大暴雨(>48 mm),此次天气过程具有降水持续时间长、范围广、局地短时降雨强等特点。

暴雨和强对流天气引发山洪、泥石流、局地冰雹

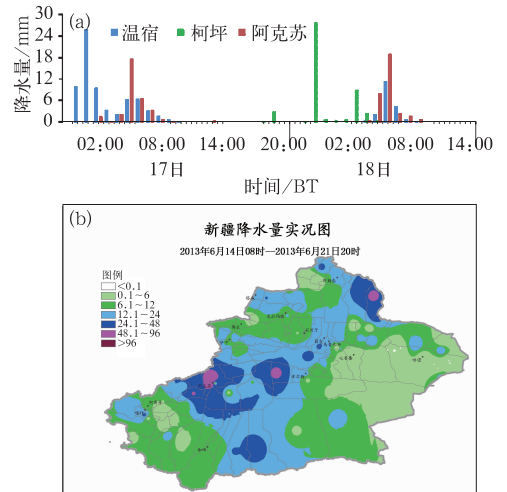


图1 2013年6月新疆自动气象站逐时降水量(a)和过程降水量(b,单位:mm)

(a) 16日20:00至18日14:00,

(b) 14日08:00至21日20:00

Fig. 1 Hourly precipitation of automatic meteorological station (a) and process precipitation (b, unit: mm) in Xinjiang in June 2013

(a) 20:00 BT 16 to 14:00 BT 18,

(b) 08:00 BT 14 to 20:00 BT 21

等气象和地质灾害,对南疆各地州的交通、水利设施、农业生产和居民生活等造成不利影响。

本文采用南疆西部加密气象观测站逐小时降水量资料、常规观测资料、NCEP一日4次 $1^{\circ}\times 1^{\circ}$ 再分析,利用MICAPS系统分析其演变,Grads绘图。

## 2 南疆暴雨产生的环流背景及水汽条件

新疆诸多暴雨的研究(江远安等,2001;杨莲梅等,2003;张家宝等,1986;张云惠等,2013)表明,要产生区域性持续性暴雨就必须具备良好的水汽输送条件,而水汽输送通道的建立则需要高中低纬、高中低层及上、下游系统的相互配置。当西南暖湿气流翻越高原进入南疆盆地时,因焚风效应,干绝热升温,相对湿度减小,因此不能产生降水或降水量很小。但是当盆地受冷空气控制时暖湿气流进入盆地后,将不再下沉,而是沿冷空气界面继续上升,气温下降,相对湿度加大,从而产生降水。

### 2.1 暴雨是在多个系统共存的背景下形成

#### 2.1.1 100 hPa 南亚高压双体型的建立与维持

15日20时100 hPa南亚高压双体型开始形成(图略),有两个高压中心分别位于伊朗高原和青藏高原东部,16—17日南亚高压的双体型进一步发展并东西振荡,使得副热带长波槽开始建立于 $70^{\circ}\sim 80^{\circ}\text{E}$ 的中亚至新疆西部地区,脊的振幅由西强东弱转为东强西弱,有利于长波槽前西南急流的建立、维持及南伸(杨莲梅等,2003;张家宝等,1986),西南急流轴位于新疆西部。17日随着南亚高压的东西振荡,副热带大槽南伸至 $30^{\circ}\text{N}$ 附近,使西南急流在

南疆西部得以长时间维持,青藏高原高压中心在 $35^{\circ}\text{N}$ 附近摆动。19日南亚高压双体型破坏,南疆大降水趋于结束。

#### 2.1.2 500 hPa 中亚低值系统的活跃及南伸

13—15日里海咸海脊发展并与欧洲脊叠加,脊前西北气流引导冷空气南下,在西西伯利亚至中亚南部的高、中、低纬存在三个低槽活动,西西伯利亚低槽位于 $50^{\circ}\text{N}$ 以北,塔什干附近为低涡,而阿拉伯海至印度半岛低槽前西南气流北伸至青藏高原。15—16日随着里海咸海脊向北发展,西西伯利亚低槽受冷空气补充加深南压至巴尔喀什湖北部,受其外围冷空气影响,塔什干低涡减弱东移进入南疆,同时,西太平洋副热带高压西伸北进明显,588 dagpm西伸至 $100^{\circ}\text{E}$ (图2a)。17日西太平洋副热带高压稳定维持,而里海咸海脊继续向北发展,脊前北风带引导冷空气南下,使得西西伯利亚低槽南伸并在巴尔喀什湖附近切断成低涡,与中亚低槽汇合并分裂短波东移影响南疆(图2b)。18日里海咸海脊至乌拉尔山脊维持,同时下游贝加尔湖脊强烈发展,使得巴尔喀什湖低涡移动缓慢,并再次分裂波动影响南疆西部。19日巴尔喀什湖低涡减弱继续分裂短波东移,影响北疆降水和喀什、阿克苏的局地强对流天气。

暴雨期间,中亚低槽北部和南部均为低值系统活动,也使得南疆西部一直处于低槽活动区,同时伊朗副热带高压的发展与替换及西太平洋副热带高压的西伸北进及稳定维持,都为此次暴雨提供了有利的环流背景。

#### 2.1.3 高低空三支气流配置

15—18日200 hPa副热带大槽的建立与维持,使中亚槽前西南急流进入南疆西部,急流中心位于 $35^{\circ}\text{N}$ 、 $80^{\circ}\text{E}$ 附近,15—17日急流轴风速由 $48\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$

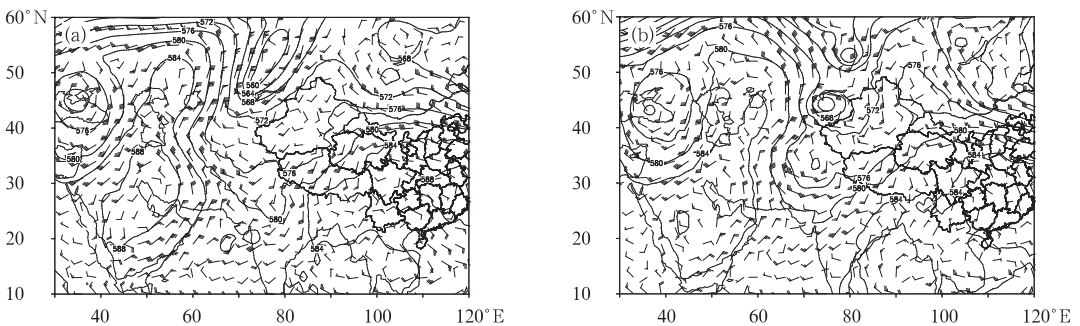


图2 2013年6月16日20时(a)和17日20时(b)500 hPa位势高度及风场  
Fig. 2 The 500 hPa geopotential height and wind field at 20:00 BT 16 (a) and 20:00 BT 17 (b) June 2013

增强为  $60 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 强西南急流的维持为暴雨产生提供了高空辐散抽气作用, 暴雨发生在西南急流入口区的左侧。

500 hPa 南疆西部为气旋性风场的辐合, 使得暖湿空气得以集中, 同时, 自阿拉伯海—印度半岛—青藏高原维持一支西南气流向盆地南缘汇合, 中亚低值系统的活跃与低纬暖湿气流向北输送, 也为南疆西部暴雨提供了充足的水汽。

此次暴雨 700 hPa 南疆盆地偏东急流比 850 hPa 强, 急流轴风速最大为  $16 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 在维持时段和强度上日变化明显, 即傍晚到夜间大, 因此, 偏东急流西伸的程度不同, 也决定了水汽在南疆西部的辐合点不同, 使得低层水汽迅速集中落区不同, 造成的暴雨落区也不同。

上述高、中及低空风场的配置(图 3)与南疆西部夏季典型大降水配置一致(黄艳等, 2012; 刘皑国等, 2005; 张云惠等, 2013)。

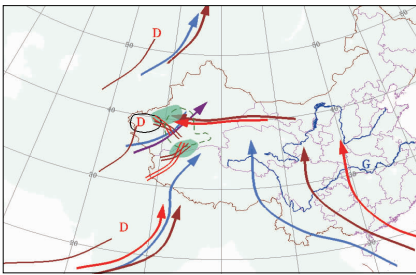


图3 2013年6月16日20时高低空配置

(→ 850 hPa显著气流 → 700 hPa显著气流 → 500 hPa显著气流  
→ 200 hPa急流 → 500 hPa槽线 → 850 hPa切变线  
→ 850 hPa切变线 → 700 hPa  $T-T_0 < 4 \text{ }^\circ\text{C}$ , 绿色阴影为暴雨区)

Fig.3 Flow configuration of upper and lower levels at 20:00 BT 16 June 2013

(→ 850 hPa Significant flow → 700 hPa Significant flow → 500 hPa Significant flow  
→ 200 hPa jet stream → 500 hPa Trough line → 850 hPa Shear line  
→ 850 hPa Shear line → 700 hPa  $T-T_0 < 4 \text{ }^\circ\text{C}$ , Green shadow area is rainstorm)

### 2.1.4 中尺度辐合与暴雨落区

15—18日, NCEP一日4次 $1^\circ \times 1^\circ$ 再分析700和850 hPa流场表明, 南疆西部有明显的中尺度辐合, 且700 hPa比850 hPa强, 中尺度的辐合和切变与强降水落区相对应, 因此, 中尺度辐合是强降水的直接作用者。

值得一提的是, 此次大降水落区以和田—喀什南部—北移至克州北部—阿克苏的弧形路径移动, 这和南疆西部三面环山向东开口的喇叭口地形有很大关系, 南疆西部200 hPa西南急流、500 hPa偏南急流及850/700 hPa盆地偏东急流三支气流的作

用, 使得阿克苏地区处于迎风坡, 地形的抬升与辐合, 促使上升运动增强, 加剧了冷暖空气交汇, 使得水汽在南疆西部辐合与集中, 助推暴雨增幅。

## 2.2 暴雨的水汽特征及不稳定能量

环境大气所含水汽的丰沛程度与引发的暴雨强度有密切关系, 而南疆三面环山的地形, 平均海拔在3 km以上, 水汽难以到达, 暴雨期间环流配合FY-2D卫星云图红外及水汽云图可以直观地看到, 西西伯利亚—中亚—印度半岛即高中低纬存在三支云系活动, 巴尔喀什湖北部为涡旋云系尾部, 中亚至南疆西部的低涡云系减弱东移, 自阿拉伯海—印度半岛—青藏高原有一支斜压带状云系随偏南气流北上至新疆上空, 本文采用比湿来观察暴雨区水汽丰沛程度的演变特征。

### 2.2.1 比湿

从暴雨区比湿及各层比湿随时间的演变可以看到(图略), 850 hPa 15日20时比湿  $10 \sim 12 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$  的大值区在偏西的喀什地区, 达到南疆西部夏季降雨的基本条件。16日20时比湿大值区东移北上到和田至阿克苏一线。17日20时南疆盆地大部低层比湿均在  $12 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$  以上, 即南疆降雨开始后盆地比湿明显增大且日变化明显, 伴着对流层中低层比湿的每一次间断性增大, 降水强度也增强, 而相当于南疆盆地近地层的925 hPa比湿均比850 hPa大  $4 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 即高湿区在近地层最大。

阿克苏站整层比湿随时间的变化图上(图4), 比湿较大的主要分布在700 hPa以下,  $14 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$  大值区在850 hPa及以下, 高比湿中心表现为明显

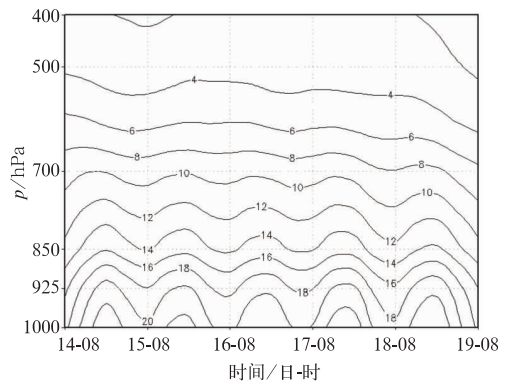


图4 2013年6月14—19日阿克苏站比湿高度-时间变化图(单位:  $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )

Fig.4 Specific humidity height-time diagrams in Aksu in 14-19 June 2013 (unit:  $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )

的日变化波动,即 20 时前后最大,早晨最小,这与新疆盆地低层偏东急流在夜间增强相对应,也与大降水时段相吻合。

### 2.2.2 大气层结稳定度

由于南疆西部绿洲平原海拔 1.5 km 以下,绿洲与戈壁相间,属温带荒漠干旱气候,夏季尤其是傍晚前后山谷风效应容易产生局地强对流天气,单站 CAPE 值、K 指数和沙氏指数可以很好地预示潜在不稳定情况,通过多年预报实践表明,当 K 指数 > 30℃ 且沙氏指数  $SI < 0$ ,CAPE 突然增大时,对于预

报新疆雷暴、冰雹及短时强降水等局地强对流有一定的指示意义,利用常规探空及夏季 14 时探空加密观测,分析暴雨期间喀什、阿克苏的  $T-\ln p$  的时间变化表明(表 1),K 指数、SI 指数及 CAPE 日变化明显,即傍晚和早晨喀什、阿克苏的  $K > 30^\circ\text{C}$  且  $SI < 0$ ,中午有所减弱,而 CAPE 却表现为中午到傍晚明显增大,因降水强度、落区及时段不同,两站各不稳定指数变化时段有所不同,表明傍晚到早晨南疆西部具有明显的对流潜势。

表 1 2013 年 6 月 16—18 日单站探空物理量参数

Table 1 Physical parameters of single station sounding from 08:00 BT 16 to 08:00 BT 18 June 2013

探空物理量参数	16 日			17 日			18 日		
	08:00	14:00	20:00	08:00	14:00	20:00	08:00	14:00	20:00
喀什 K 指数/℃	39	17	34	30	29	23	30	37	14
喀什 SI 指数/℃	-4.22	2.89	-0.4	-1.57	0.38	3.12	-2.04	-2.21	3.64
喀什 CAPE/J · kg <sup>-1</sup>	69.9	259.1	12.9	0	578.3	28.2	172	699.5	98
阿克苏 K 指数/℃	19	27	30	30	20	36	32	36	32
阿克苏 SI 指数/℃	4.06	-0.1	1.82	2.71	3.54	-0.45	1.18	-1.1	-3.21
阿克苏 CAPE/J · kg <sup>-1</sup>	0	16.1	58.7	0	48.4	577.2	0	209.9	1058.4

综上所述,此次大降水是在高层南亚高压双体型的维持及东西振荡、中层中亚低值系统的活跃与南伸、伊朗副热带高压的南北振荡、西太平洋副热带高压的西伸北抬、中低层风场的辐合及切变等多个系统共同影响下产生的,暴雨过程环流型的重要特点主要体现在对流层中低层。那么,这样的一种多系统配置形成的共同作用在大气中低层会导致什么样的动力过程?如何在这些动力过程驱动下实现水汽的远程输送,使南疆西部有异常丰沛的水汽供应,从而造成南疆暴雨的?以下重点讨论。

## 3 导致暴雨区水汽异常丰沛的重要动力过程

### 3.1 中低层偏南气流持续北上及其在水汽远程输送的作用

暴雨期间,500 hPa 在中亚至印度半岛的低压带前存在着一支从低纬一直到 40°N 附近的偏南气流带,并且持续北上至南疆,这支气流将水汽从阿拉伯海和孟加拉湾输送到新疆西部,水汽辐合于低空偏东急流交汇的南疆西部。由于摩擦的作用,偏南风在北进的过程中会有所减弱,因此,必然存在一种动力过程使得丰沛的水汽能够从两千多千米以外的地方越过青藏高原源源不断地远距离输送到南疆。

那么,究竟是什么驱动力可以使水汽从阿拉伯海和孟加拉湾长途跋涉输送到新疆呢?

此次南疆大降水的特点表现为时间上有间断而强降水落区较分散,说明受多个波动影响,分析三个不同时刻(15 日 20 时、16 日 20 时和 17 日 20 时)500 hPa 风场表明,15 日 20 时印度半岛的偏南气流开始北上至青藏高原,偏南风为 8~10 m · s<sup>-1</sup>,此阶段降水主要由 500 hPa 塔什干低涡气旋性风场和低层偏东急流在南疆西部交汇造成的,850 hPa 在南疆盆地有一支偏东气流的水汽输送,水汽通量中心最大值 11 g · cm<sup>-1</sup> · hPa<sup>-1</sup> · s<sup>-1</sup>,南疆西部 5 g · cm<sup>-1</sup> · hPa<sup>-1</sup> · s<sup>-1</sup> 左右。16 日 20 时 500、700 hPa 印度半岛低槽前偏南风明显加强,风速增大至 12~16 m · s<sup>-1</sup>,500 hPa 偏南气流北上至青藏高原,加大了向南疆的水汽输送,从图 5 可以看到,整个水汽输送带上的水汽通量值增大,青藏高原南部达到 8~10 g · cm<sup>-1</sup> · hPa<sup>-1</sup> · s<sup>-1</sup>,同时,由于西太平洋副热带高压的西伸,700 hPa 有一支自孟加拉湾—南海—四川盆地—河西走廊—南疆盆地的水汽输送带,南疆盆地水汽通量达到 8~9 g · cm<sup>-1</sup> · hPa<sup>-1</sup> · s<sup>-1</sup>。17 日 20 时 500 hPa 偏南急流继续增强,急流核风速达到 16~20 m · s<sup>-1</sup>,而且偏南气流北上至新疆,伴随着低空 700/850 hPa 偏东急流增

强,盆地水汽通量中心也进一步增大至  $10\sim 15\text{ g}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{hPa}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$  向西移动进入南疆上空,同时  $500\text{ hPa}$  巴尔喀什湖低槽受到北方冷空气的补充切涡,低涡外围分裂波动进入阿克苏地区,受高、中、低空三股气流的影响,阿克苏地区产生暴雨。因此,偏南风增速形成了中低空急流,而且急流核向北移动不仅有利于水汽的长距离输送到南疆,同时也造成了水汽在阿克苏上空强烈辐合,由高层新疆处于强西南急流可见,源自于阿拉伯海的水汽可以通过高层引导气流进入南疆西部。

综上所述,来自阿拉伯海和孟加拉湾丰沛的水汽之所以能够被远距离输送到南疆为南疆西部形成特大暴雨提供了必要的水汽条件,重要的原因是

流层中层承担水汽输送的偏南风持续北上、急流核不断向北移动至新疆。伴随着上述动力过程,中低层水汽通量增大并在南疆西部形成强烈的水汽通量辐合中心,造成水汽强烈辐合,为暴雨提供了良好的水汽条件。上述分析清楚表明在伊朗高压稳定维持的情况下,位于中亚的低压带不断分裂波动东移,造成两者之间东西方向上的位势高度梯度增大,在向北地转偏向力影响下南风分量加大。同时,低层南疆盆地偏东急流间断性建立,在输送水汽的同时,与中高层偏南气流在南疆西部交汇,每一次的辐合中心对应大的降水中心,这表明低空偏东急流在水汽集中与辐合中起了至关重要作用。

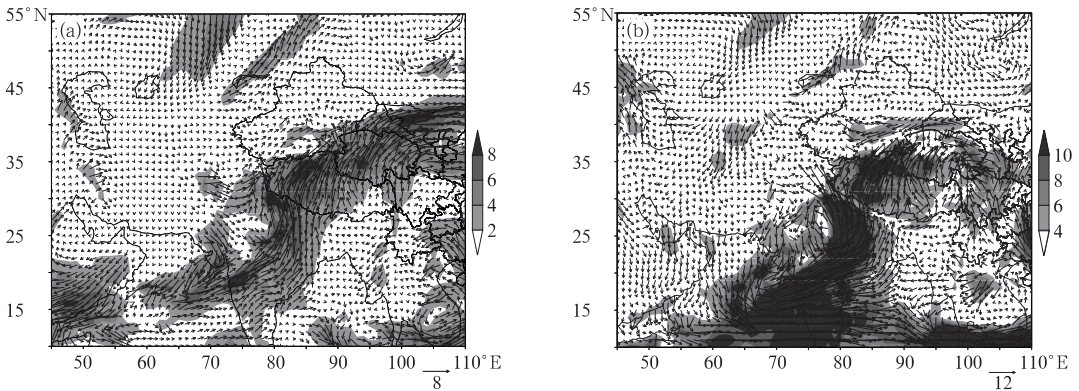


图5 2013年6月16日20时(a)500 hPa和(b)700 hPa水汽通量

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

Fig. 5 Water vapor flux (vector) at 500 hPa (a), 700 hPa (b) at 20:00 BT 16 June 2013

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

### 3.2 高低空耦合加大了水汽辐合及垂直输送

15日20时至20日20时的200 hPa水平散度和风速分布表明(图略),高空西南急流自新疆西部持续东南移至南疆盆地,在急流入口区的南侧  $35^\circ\text{N}$  附近分布着  $36\times 10^{-5}\text{ s}^{-1}$  的辐散中心。在700 hPa上,偏东低空急流前方则有  $-30\times 10^{-5}\text{ s}^{-1}$  的辐合中心,高空辐散中心与低层辐合中心几乎重合,形成了高低空急流耦合。18日20时,高低空散度中心东移到  $76^\circ\text{E}$ (阿克苏西部上空),高空辐散仍有  $8\times 10^{-5}\text{ s}^{-1}$ ,对流层低层辐合最大在700 hPa为  $-15\times 10^{-5}\text{ s}^{-1}$ ,高低空急流的耦合达到最强。

从暴雨过程中垂直速度沿  $81^\circ\text{E}$  的经向剖面(即沿暴雨中心)可以看到(图6),16—18日的傍晚到夜间,阿克苏南部均有一个闭合的中尺度垂直环

流圈,中心位于700 hPa附近,上升运动沿从南向北的地形迎风坡增强,且日变化明显,每一次中尺度垂直环流圈的建立及增强,与强降水落区、时段相对应,可见,地形对降水强度及日变化的影响。

### 3.3 暴雨区的水汽收支特征分析

应用NECP一天4次  $1^\circ\times 1^\circ$ 再分析资料,计算2013年6月14—20日暴雨区( $35^\circ\sim 43^\circ\text{N}$ ,  $74^\circ\sim 86^\circ\text{E}$ )水汽输入、输出和收支量(正值为流入,负值为流出),取地面至700 hPa(对流层低层)、700~500 hPa(对流层中层)、500~300 hPa(对流层高层)以及整层(地面至300 hPa),分析不同层次水汽输送特征及暴雨过程的水汽收支情况,结果表明(图7),降水前期(15—16日)西边界整层为水汽输入,南边界700 hPa以上和东边界700 hPa以下为

水汽输入,北边界 700 hPa 以下水汽输入时 700 hPa 以上是输出的;暴雨期(17—19 日)西边界整层和南边界 500 hPa 上水汽输入明显增多,尤其是 17 日南边界的水汽输入达到最强,而北边界仍是 700 hPa 以上水汽输入呈波动性,东边界 700 hPa 以下为间断性水汽输入;随着降水趋于结束,南边界水汽输入骤然减少,东边界整层转为净输出,而在整个暴雨过程中,西边界整层为水汽净输入。

计算 6 月 14 日 20:00 至 20 日 20:00 暴雨时段整层水汽收支可见,西、南两个边界的水汽输入量分别为  $87 \times 10^8$  和  $218 \times 10^8$  t,北、东边界的水汽输出量分别为  $52 \times 10^8$  和  $205 \times 10^8$  t,暴雨过程中南边界水汽输入贡献占 71%,起到了重要作用,也说明阿拉伯海至中亚南部的偏南气流水汽接力输送是非常充沛的,这和前面所分析的高低层急流配置和水汽通量分布一致。

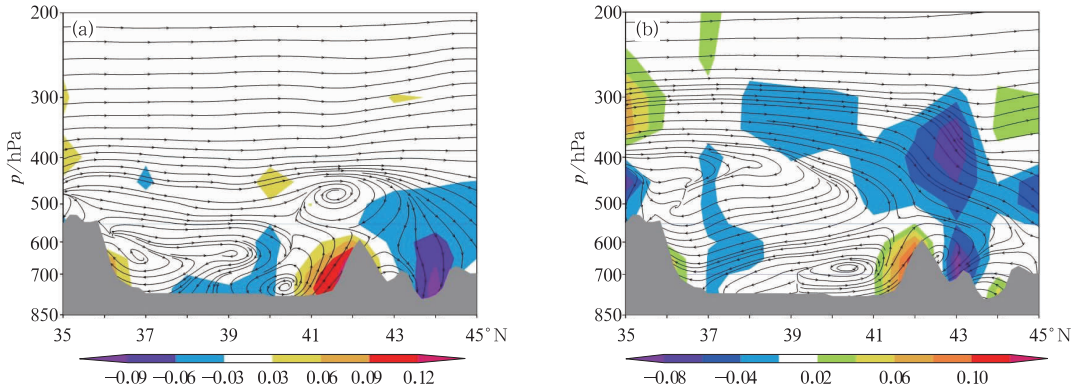


图 6 2013 年 6 月 16 日 20:00(a)和 17 日 20:00(b)沿  $81^\circ\text{E}$  的垂直剖面

(彩色区为垂直速度,单位:  $10^{-2} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ;阴影区为地形)

Fig. 6 Vertical cross section along  $81^\circ\text{E}$  at 20:00 BT 16 (a) and 20:00 BT 17 (b) June 2013

(Color area denotes vertical velocity, unit:  $10^{-2} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , shaded area denotes topography)

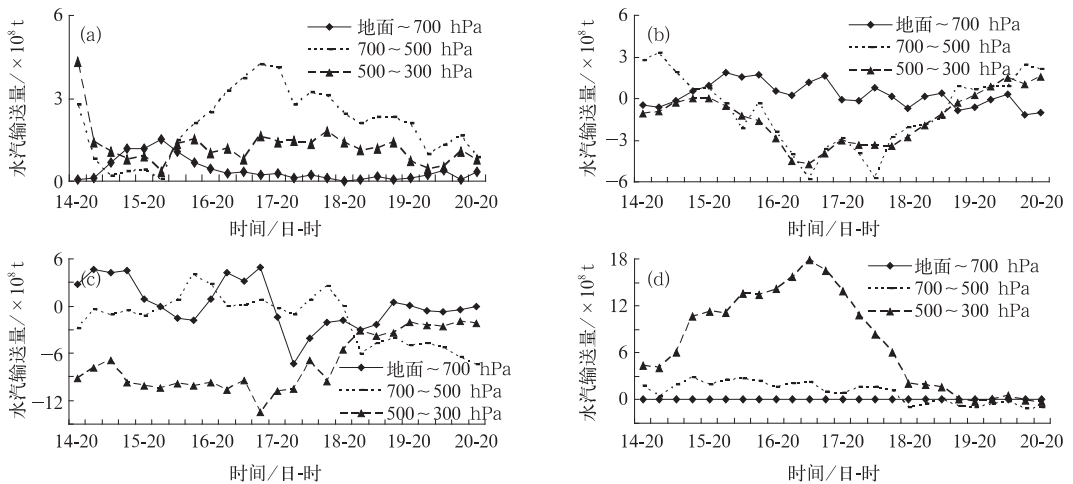


图 7 对流层高、中、低层每隔 6 h 各边界水汽输送量(单位:  $10^8 \text{ t}$ )

(a) 西边界, (b) 北边界, (c) 东边界, (d) 南边界

Fig. 7 The quantity of vapor transfer for the low, middle and upper levels from the

west (a), north (b), east (c), and south (d) directions, at 6 h intervals (unit:  $10^8 \text{ t}$ )

### 3.4 新疆西部持续性暴雨的配置模型

基于上述分析,导致新疆西部持续性暴雨、水汽

输送的天气尺度动力过程为(图 8):500 hPa 在塔什干低涡减弱东移时,伊朗高压稳定维持,下游贝加尔湖脊向北经向发展,导致中纬度地区东西方向位势

高度梯度增大,在向东地转偏向力作用下,偏南气流明显增强,西太平洋副热带高压西伸北抬。在它们的共同作用下使得阿拉伯海—青藏高原向北输送水汽的偏南风持续增强北上至新疆,低层700/850 hPa盆地偏东风间断性建立,从而在暴雨区产生了强的水汽辐合。而且,高空强辐散叠置在低空不断增强的辐合中心上空形成的高低空强烈耦合,一方面增大了低空水汽的聚积,同时对低空急流也产生正反馈影响;另一方面,通过增强上升运动,增大了低层水汽向上输送,有利于形成深厚的湿层。在上述动力过程的作用下,来自阿拉伯海和孟加拉湾的潮湿空气被远距离输送到新疆,为暴雨提供了必要的水汽条件,而河西走廊—南疆盆地的低空偏东急流在水汽辐合中起到至关重要作用。

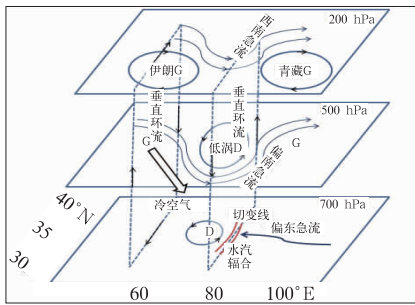


图8 2013年6月14—19日南疆西部暴雨流型配置图

Fig. 8 The conceptual model of rainstorm over the West of Southern Xinjiang during 14—19 June 2013

## 4 结论

本文针对暴雨过程的一个关键条件——水汽输送及其动力过程展开了讨论,分析了导致暴雨区内水汽异常丰沛的天气尺度动力过程,得到以下结论:

(1) 南疆西部暴雨发生在异常潮湿并且具有深厚湿层的环境中。在强降水发展阶段,边界层内的比湿达  $16\sim 18\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 700 hPa 也达到了  $10\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 而且,上述湿度分布表现为日变化周期,为暴雨的形成提供了必要的水汽条件。

(2) 造成南疆西部暴雨的水汽来自于阿拉伯海和低涡本身两个水汽源地。充沛的水汽之所以能够如此远距离地从低纬海面越过青藏高原输送到处于中纬的新疆,主要是有一次重要的天气尺度动力过

程,在它的作用下,实现了水汽的远距离输送而且持续北上。这一天气尺度动力过程包括如下几个方面:一是500 hPa中亚南北向的低压带及稳定的伊朗高压使得南疆西部盛行西南气流的,纵贯南北(从低纬海面到新疆)的水汽通道;二是低层偏东急流的强度间断性增强;三是中低层来自孟加拉湾的东南季风和阿拉伯海偏南气流的汇合,加强了偏南气流的强度;四是上述500 hPa南北向的低压带的中部塔什干低涡减弱东移,由于地转偏向力的作用,使偏南气流得到了进一步增强。由此不仅抵消了地面摩擦影响,而且在上述第二和第四个动力因子共同作用下,增强了中层偏南气流的强度,偏南气流增强导致向北的水汽通量也明显增大。同时,在南疆盆地低空偏东急流和高层西南急流的共同作用下,南疆西部上空形成了强的水汽辐合。此外,在暴雨发生期间增强的高低空耦合(高层强烈辐散与低层强烈辐合的耦合)也是使得低空水汽辐合以及水汽垂直输送增大的动力过程,同时对低空急流的增强也有正反馈影响。

(3) 在暴雨区水汽通量计算表明,暴雨区水汽输送主要来自西、南面,西边界整层为净流入,而南边界中高层为净流入,水汽输入表现为间断性的日变化,对流层低层的偏东急流在暴雨的水汽输送及水汽通量辐合中起着关键作用。强降雨发展的时刻即16—17日中高层南边界水汽输入量为暴雨形成阶段(15日)的2倍,17日暴雨区的水汽通量辐合强度最大。在强降水发展阶段,水汽由低层向高层输送的垂直输送强度也是强降雨形成阶段的近2倍,最大水汽垂直输送维持在低层,这些都是强降雨形成和发展阶段的水汽输送的重要特征。

(4) 在上述分析与计算基础上给出南疆西部暴雨的配置模型。

## 参考文献

- 陈春艳,孔期,李如琦. 2012. 天山北坡一次特大暴雨过程诊断分析. 气象, 38(1): 72-80.
- 黄艳,刘涛,张云惠,等. 2012. 2010年盛夏南疆西部一次区域性暴雨天气特征. 干旱气象, 30(4): 615-622.
- 江远安,包斌,王旭. 2001. 南疆西部降水天气过程的统计分析. 沙漠与绿洲气象(新疆气象), 24(5): 19-20.
- 井喜,井宇,陈闯,等. 2014. 黄土高原 $\beta$ 中尺度致洪暴雨特征及成因. 气象, 40(10): 1183-1193.
- 柯文华,俞小鼎,林伟旺,等. 2012. 一次由“列车效应”造成的致洪暴雨分析研究. 气象, 38(5): 552-560.
- 刘皓国,张云惠,杨利鸿. 2005. 喀什地区暴雨特征及预报. 沙漠与绿



- 洲气象(新疆气象),28(增刊):12-13.
- 刘海涛,刘海红,张云惠,等.2013.南疆西部沙漠边缘汛期两次罕见暴雨过程诊断分析.干旱区资源与环境,27(8):90-96.
- 林建,杨贵名.2014.近30年中国暴雨时空特征分析.气象,40(7):816-826.
- 梁生俊,马晓华.2012.西北地区东部两次典型大暴雨两个例对比分析.气象,38(7):804-813.
- 孙军,湛芸,杨舒楠,等.2012.北京721特大暴雨极端性分析及思考(二)极端性降水成因初探及思考.气象,38(10):1267-1277.
- 孙兴池,郭俊建,王业宏,等.2015.低涡和副热带高压共同影响下的暴雨落区分析.气象,41(4):401-408.
- 孙兴池,王西磊,周雪松.2012.纬向切变线暴雨落区的精细化分析.气象,38(7):779-785.
- 陶诗言.1980.中国之暴雨.北京:科学出版社,1-10.
- 王伏村,付双喜,张德玉,等.2014.一次引发河西走廊大暴雨的高原低涡的机制分析.气象,40(4):412-423.
- 王晓芳,黄华丽,黄治勇.2011.2010年5—6月南方持续性暴雨的成因分析.气象,37(10):1206-1215.
- 杨莲梅.2003.南亚高压突变引起的一次新疆暴雨天气研究.气象,29(8):21-25.
- 杨霞,赵逸舟,王莹,等.2011.近30年新疆降水量及雨日的变化特征分析.干旱区资源与环境,25(8):82-87.
- 张家宝,苏起元,孙沈清,等.1986.新疆短期天气预报指导手册.乌鲁木齐:新疆人民出版社,456.
- 张俊岚,刘勇达,杨柳,等.2009.2008年初南疆持续性降雪天气过程水汽条件分析.气象,35(11):55-63.
- 张云惠,陈春艳,杨莲梅等.2013.南疆西部一次罕见暴雨过程的成因分析.高原气象,32(01):191-200.
- 张云惠,贾丽红,崔彩霞,等.2013.2000—2011年新疆主要气象灾害时空分布特征.沙漠与绿洲气象,7(增刊):20-23.
- 张云惠,王勇,支俊,等.2009.南疆西部一次强降雨的多普勒雷达分析.沙漠与绿洲气象,3(6):17-20.