

孔祥伟,杨建才,李红,等,2021. 河西走廊西部干旱区一次极端暴雨天气的水汽特征分析[J]. 气象,47(4):412-423. Kong X W, Yang J C, Li H, et al, 2021. Analysis on water vapor characteristics of an extreme rainstorm in the arid region of Western Hexi Corridor[J]. Meteor Mon, 47(4):412-423(in Chinese).

河西走廊西部干旱区一次极端暴雨天气的水汽特征分析^{*}

孔祥伟^{1,2} 杨建才¹ 李 红³ 傅 朝¹

1 兰州中心气象台,兰州 730020

2 兰州大学大气科学学院/兰州天气气候联合研究与实训中心,兰州 730000

3 中国气象局兰州干旱研究所/甘肃省干旱气候变化与减灾重点实验室,兰州 730020

提 要: 利用高空、地面观测资料、加密区域站雨量资料、FY-2D 云图、NCEP $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 再分析资料,使用物理量诊断、后向轨迹模型等方法分析了 2011 年 6 月 15—16 日河西走廊西部干旱区一次极端暴雨天气的环流形势、中尺度系统、水汽输送和收支特征。结果表明:河西走廊西部受内蒙古西部到河套地区西北—东南向暖性高压脊西部形成的高原低涡中心影响,200~400 km 的低涡中心稳定维持在暴雨区上空超过 12 h,形成了良好的动力条件;对流层低层湿度增大气温降低,中层冷空气从低涡南部侵入,大气处于弱不稳定状态,地面风速辐合、地形抬升进一步增强了低涡中心的上升运动,触发局地对流。主要存在随西风气流的西路和绕高原的东路两条水汽输送通道,以绕高原的东路水汽输送为主,其在暴雨期间的贡献率高达 84.6%,以对流层中层输入最为显著。甘肃中部 500 和 700 hPa 异常偏东气流对东路水汽输送通道的形成十分重要,其能将已到达西北地区东部的暖湿空气继续向西北方向输送从而到达河西走廊西部。暴雨时段内水汽平均净输入强度是前期的 2.73 倍,对流层中层高原低涡中心、对流层低层风速风向辐合和地形辐合造成暴雨区 550、700 和 800 hPa 三层 200~400 km 的水汽辐合中心,大气可降水量高达 34 mm,是夏季平均值的 2 倍多。

关键词: 干旱区暴雨,高原低涡,水汽输送,水汽收支,HYSPLIT 轨迹模式

中图分类号: P458

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2021.04.003

Analysis on Water Vapor Characteristics of an Extreme Rainstorm in the Arid Region of Western Hexi Corridor

KONG Xiangwei^{1,2} YANG Jiancai¹ LI Hong³ FU Zhao¹

1 Lanzhou Central Meteorological Observatory, Lanzhou 730020

2 College of Atmospheric Sciences, Lanzhou University/Joint Center of Research and Training for Weather and Climate Prediction, Lanzhou 730000

3 Institute of Arid Meteorology, CMA/Key Laboratory of Arid Climatic Changing and Reducing Disaster of Gansu Province, Lanzhou 730020

Abstract: Based on station observations (surface observations and upper-air soundings at weather stations and precipitation observations at regional stations), FY-2D infrared images, water vapor images and NCEP reanalysis data with the resolution of $1^{\circ} \times 1^{\circ}$, combined with water vapor flux diagnosis and a backward trajectory model, an extreme rainstorm process which occurred in the arid region of western Hexi Corridor

^{*} 甘肃省气象局创新团队(GSQXCXTD-2020-01)、中国气象局预报员专项(CMAYBY2019-121)和甘肃省气象局气象科研项目(Zd2021-01)共同资助

2019 年 11 月 10 日收稿; 2020 年 8 月 3 日收修定稿

第一作者:孔祥伟,主要从事强对流天气预报与研究. E-mail:xiangwei580@163.com

通讯作者:杨建才,主要从事灾害性天气预报及研究. E-mail:1512322427@qq.com

during 15–16 June 2011 was analyzed to study the transport mechanism of water vapor and its budget in the process. The results are as follows. The western Hexi Corridor was affected by the plateau vortex center formed from the western part of warm high-pressure ridge which ran northwest-southeast from western Inner Mongolia to Hetao Area. The plateau vortex center with 200–400 km scale remained stable over the rainstorm area for more than 12 hours, forming good dynamic conditions. The humidity increased and the temperature decreased in the lower troposphere. The cold air invaded from the southern plateau vortex in middle layer. The atmosphere was in a weakly unstable state. The convergence of surface wind speed and the effect of terrain upwind slope triggered local convective weather. The water vapor needed by rainstorm was mainly from the west wind flow and the east wind flow bypassed the plateau, and the latter brought the most water vapor with its contribution rate during rainstorm as high as 84.6%. Further more, the water vapor from two channels were both the most pronounced in the middle and low layer of the troposphere. The formation of anomalous easterly airflow in central Gansu at 500 hPa and 700 hPa was important for water vapor transport and convergence in the rainstorm area. The average net input intensity of water vapor during the rainstorm period was 2.73 times of that the pre-rainstorm period. The low vortex center in the middle troposphere, the convergence of wind speed and direction in the lower troposphere, and the convergence of terrain caused the 550 hPa, 700 hPa, and 800 hPa three-layer water vapor convergence center with 200–400 km scale. The atmospheric precipitable water in the rainstorm center was as high as 34 mm, which was more than 2 times the summer average.

Key words: arid region rainstorm, plateau vortex, water vapor transport, water vapor budget, HYSPLIT model

引言

由于气候-水文过程的差异,地球上各地区的蒸发与降水不平衡。当蒸发超过降水时,形成缺水的干旱地区,反之形成富水的湿润地区。通常将年降水量在 200 mm 以下的地区称为干旱区,年降水量在 200~500 mm 的地区称为半干旱区。我国西北地区大部分地方的年降水量不足 300 mm,蒸发能力却在 1000 mm 以上,属于典型的干旱半干旱区,而位于西北地区中部的河西走廊则是西北地区降水量最少的地方之一(葛其方,1983;俞亚勋等,2000;黄玉霞等,2004),属极端干旱区,由于受水汽条件限制(黄小燕等,2018),暴雨天气很少,年平均发生次数不足一次(孔祥伟和陶健红,2012),对其的准确预报预警一直是个难题。以往学者针对该地区暴雨天气主要从天气个例形势和物理量诊断(李文莉等,2013;王伏村等,2013;孔祥伟等,2015)、数值模拟(李江林等,2014;王田田等,2014)等方面进行了分析研究,总结了很多宝贵的经验。

从气候背景来说,由于青藏高原、秦岭及祁连山的阻挡,夏季来自孟加拉湾、南海和热带西太平洋的

水汽很难到达我国西北地区,因而西风带对西北地区的水汽输送有着重要意义(苗秋菊等,2004;刘世祥等,2005;王可丽等,2005;王秀荣等,2007;黄荣辉和陈际龙,2010)。水汽输送又与降水量有着直接关系,西北地区夏季降水的分布与水汽输送距平场基本一致(何金海等,2005)。但在特定的大气环流背景下,西北地区中西部局地暴雨天气过程的水汽输送与气候平均态还是存在显著差异的(杨莲梅等,2012)。因此,有必要研究河西走廊西部干旱区内暴雨天气的水汽特征。

2011年6月15–16日,河西走廊西部干旱区发生了一次极端暴雨天气,敦煌、肃北、阿克塞等多个市县出现暴雨,局地大暴雨(甘肃省地方标准 DB62/T1732–2008 规定,河西地区 24 h 暴雨标准为 30.0~69.9 mm,大暴雨标准为 70.0~140.0 mm),造成的直接经济损失超过 2.5 亿元。极端干旱区内如此强度的暴雨天气具有什么样的环流形势和中尺度特征?尤其是水汽条件如何形成?本文将在分析天气成因的基础上,着重分析此次极端暴雨天气的水汽输送、水汽收支、水汽辐合等,以加深对干旱区暴雨天气的认识,为此类暴雨预报预警提供科学的参考依据。

1 资料和方法

1.1 资料

使用 2011 年 6 月 13—17 日河西走廊西部的高空和地面观测资料、加密区域站雨量资料、FY-2D 卫星红外云图和水汽云图、NCEP $1^\circ \times 1^\circ$ 再分析资料。

1.2 水汽收支

将河西走廊西部分为八个小边界(图 1a)讨论水汽输送和水汽收支情况,其中边界 5、7 组成东边界,1、3 组成西边界,8 为南边界,2、4、6 组成北边界,东、西、南、北 4 个边界的水汽输送量为其对应的小边界水汽输送量之和。取地表至 700 hPa、700~500 hPa、500~300 hPa 和地表至 300 hPa 分别作为对流层低层、中层、高层和整层。暴雨区不同边界、不同层次的水汽输送量先由 NCEP 再分析资料计算各层各格点的水汽通量,再进行水平边界和垂直厚度积分,从而得到各边界、各层次的水汽输送量。通过边界向暴雨区有水汽输入时,水汽收支为正值,表示有净输入;通过边界暴雨区向外有水汽输出时,水汽收支为负值,表示有净输出。

1.3 HYSPLIT4 轨迹模式

HYSPLIT4 轨迹模式 (Draxler and Hess, 1998) 是由 Air Resources Laboratory, NOAA 开发,分为前向轨迹模型和后向轨迹模型,通常用来追踪气流所携带粒子或气体移动方向。其后向轨迹模型通过追踪某地、某日的气团来向,可用于分析该地、该日大气中水汽的主要来源方向。马京津和高晓清(2006)、李江萍等(2012)、王佳津等(2015)、陈红专等(2019)分别利用 HYSPLIT4 轨迹模式分析了华北地区、玛曲地区、四川、湖南等地暴雨天气或夏季的水汽输送轨迹。本文采用水汽后向轨迹模型用于分析河西走廊西部暴雨天气的水汽输送轨迹和水汽来源。

2 天气概况和环流形势

2.1 降水概况

2011 年 6 月 15—16 日河西走廊西部干旱区发

生了一次极端暴雨天气(图 1a),其中暴雨中心肃北的降水量为 77.2 mm,达到了年平均降水量的 50.6%,是肃北有观测记录以来最强降水,也是河西走廊西部日降水量的次大值(最大值 86.1 mm)。敦煌的南湖降水量(56.6 mm)、渥洼池(56.5 mm)及二墩(55.0 mm)均超过了敦煌年平均降水量(39.8 mm)。暴雨集中在酒泉南部,局地性明显,119(12)个区域(本)站中有 7(1)个站出现暴雨,具有“单点暴雨”(《西北暴雨》编写组,1992;栾晨等,2012)特征。降水从 15 日 14 时(北京时,下同)开始至 16 日 14 时结束,主要集中在 15 日 20 时至 16 日 06 时(图 1b),南湖最强小时降水量达 17.8 mm,是敦煌 6 月平均降水量(6.6 mm)的 2.7 倍。

2.2 高空环流形势

从 500 hPa 天气图形势演变看,内蒙古西部至河套地区西北—东南向的暖性高压脊(简称异常高压,下同)西部形成的高原低涡是此次天气过程的主

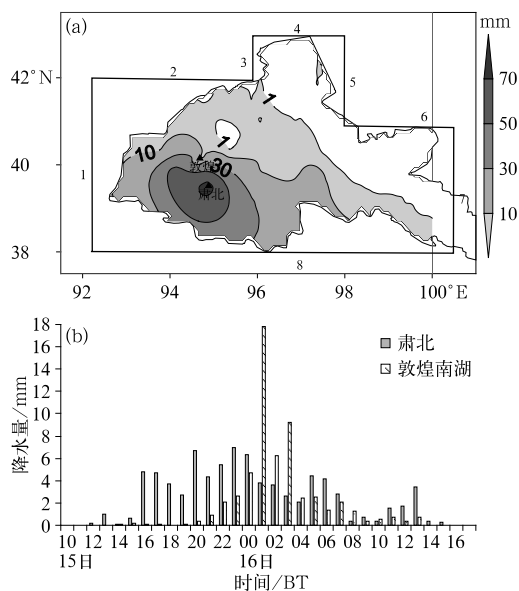


图 1 (a)河西走廊西部水汽输送边界(多边形)和 2011 年 6 月 15 日 14 时至 16 日 14 时累积降水量(阴影),(b)肃北、敦煌南湖雨量站逐小时降水量演变

Fig. 1 (a) The boundary (polygon) of water vapor transport and accumulated precipitation (shaded) in western Hexi Corridor and (b) variations of hourly precipitation at Subei and Dunhuang Nanhu meteorological stations from 14:00 BT 15 to 14:00 BT 16 June 2011

要影响系统,河西走廊西部暴雨区受高原低涡中心直接影响,尺度为 200~400 km。

15 日 08 时,异常高压形成,其低层有暖中心配合,将不断增强并稳定维持。15 日 20 时,巴尔喀什湖北部深厚冷槽分裂的冷空气东移南下经南疆地区

进入异常高压西南部,在青藏高原西部形成高原槽,芒崖和敦煌一带存在尺度为 200~400 km 的闭合气旋性环流(图 2a)。高原槽受异常高压阻挡、低纬印度气旋性环流东移及高层西南引导气流共同影响,槽线逆时针旋转,由南北向转为与异常高压一致

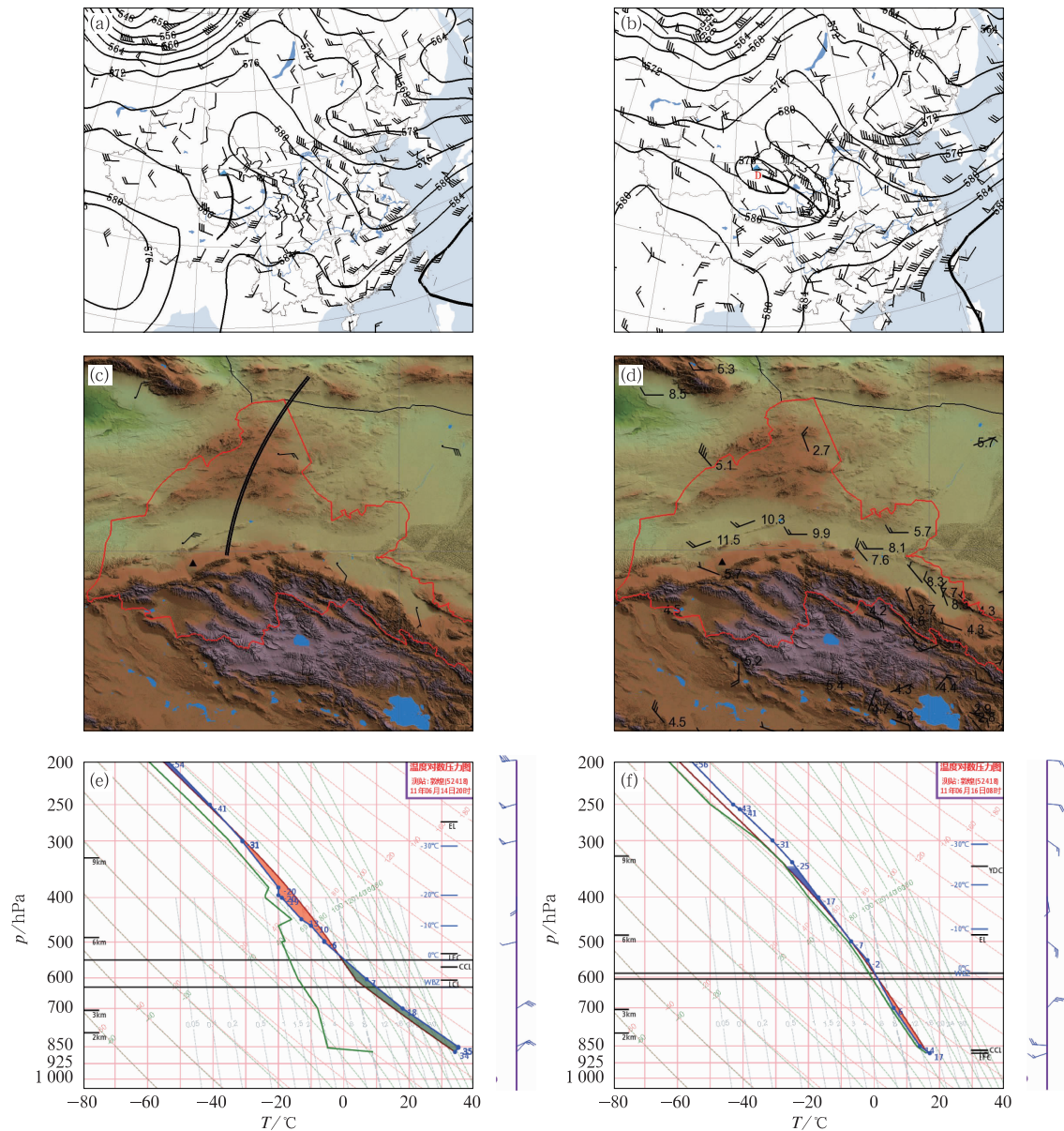


图 2 2011 年 6 月(a)15 日 20 时,(b)16 日 08 时 500 hPa 高度场(等值线,单位:dagpm)和风场(风羽);

(c)16 日 08 时 700 hPa 风场,(d)15 日 20 时地面风场和比湿(单位: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$);

(e)14 日 20 时,(f)16 日 08 时敦煌 $T-\ln p$ 图

(图 2c、2d 中,阴影为地形,黑色三角形为暴雨中心位置,图 2c 中粗黑实线为切变线)

Fig. 2 The height (contour, unit: dagpm) and wind (barb, unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) fields at 500 hPa at (a) 20:00 BT 15,

(b) 08:00 BT 16, and (c) 700 hPa wind (barb) at 08:00 BT 16,

(d) surface wind and specific humidity (unit: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$) fields at 20:00 BT 15,

(e, f) $T-\ln p$ for the Dunhuang Station at (e) 20:00 BT 14 and (f) 08:00 BT 16 June 2011

(In Figs. 2c, 2d, shadow is terrain, and triangle is the center of rainstorm; bold black solid line is shear line in Fig. 2c)

的西北—东南向,甘肃中部偏东气流显著增强,同时闭合气旋性环流发展成低涡中心,高原槽增强为高原低涡,高原低涡中心直接影响河西走廊西部暴雨区(图2b)。低涡中心受异常高压的阻挡稳定维持在河西走廊西部超过12 h,与700 hPa切变线(图2c)配合,为暴雨区提供了良好的动力条件。

2.3 异常偏东气流

西北地区产生暴雨的大尺度环流形势与西风带、副热带和热带环流系统有关,西风带系统主要为暴雨区提供干冷空气,西太平洋副热带高压和低纬热带系统主要为暴雨区直接或间接地提供暖湿空气,暖湿空气的供应对于该地区暴雨的形成尤其重要(白肇烨等,1991;《西北暴雨》编写组,1992;王荣喆等,2015)。然而暖湿空气的供应往往止步于西北地区东部,很少能到达西北地区腹地的河西走廊西部干旱区,只有当甘肃中部为强偏东气流时才有可能将已到达西北地区东部的暖湿空气继续向西北方向输送从而到达河西走廊西部。

此次暴雨过程中异常高压和高原低涡相互作用而形成的甘肃中部强偏东气流(简称异常偏东气流,下同)在500和700 hPa等压面上的风向和风速具有显著异常特征。甘肃中部500、700 hPa的6月平均风为偏西风,即使是河西走廊西部发生局地暴雨(最大值30~40 mm),500 hPa仍以偏西风或偏北风为主,700 hPa为偏西风或者弱偏东风(风速 $2\sim 4\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)。此次甘肃中部500 hPa气流风向为东风,且最大风速达 $16\sim 20\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (图2b),700 hPa偏东风风速为 $8\sim 10\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。异常偏东气流的形成,其不仅有利于暖湿空气源源不断地向河西走廊西部输送,而且也能与新疆东部的偏西气流形成水汽辐合,促成干旱区发生极端暴雨天气最为重要的水汽条件。

2.4 中尺度特征

2.4.1 不稳定能量

河西走廊西部海拔较高且下垫面多为荒漠、戈壁,气温日较差大。天气晴朗时,清晨边界层一般存在逆温层,傍晚层结温度递减率却接近干绝热递减率,但对流层低层的湿度条件很差,温度露点差常超过 20°C (图2e),近地面比湿常为 $5\sim 7\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。因此,该地区要形成有效的对流性降水,对流层低层增湿降温使大气趋于饱和,中层强降温弥补低层降温

对形成不稳定层结的不利影响。15日14时,暴雨中心肃北的24 h地面气温下降 14.8°C ,露点温度升高 10.6°C ,温度露点差为 2.5°C ,大气接近饱和状态,降水开始。15日20时,敦煌的地面比湿升至 $11.5\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ (图2d),700 hPa气温日变化达 -8°C ,CAPE值为 $24.3\text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$,随着湿度进一步增大,整层均接近饱和,16日08时,CAPE值增大至 $62.3\text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$,大气处于弱对流不稳定状态, $0\sim 3\text{ km}$ 的垂直风切变较大(图2f)。王伏村等(2013)还分析了此次暴雨区附近湿等熵面倾斜度,指出此次暴雨过程大气处于弱不稳定,且湿等熵面陡立,会导致垂直涡度和辐合显著增长,非常有利于中尺度对流系统的发生发展。

2.4.2 地形影响

河西走廊西部位于阿尔金山东段、祁连山西段与马鬃山之间,地势北低南高,北部马鬃山海拔高度多在 $1400\sim 2400\text{ m}$,南部是 $3000\sim 5000\text{ m}$ 的高山群,两山之间为谷地。近地面冷空气经南疆盆地沿谷地自西向东侵入河西走廊西部,冷空气先侵入处近地面风速较大,15日20时在敦煌附近形成风速辐合(图2d),触发敦煌附近局地对流性降水,小时降水量不断增强(图1b)。此外,地面和对流层低层偏西风在肃北处于迎风坡(图8c),700 hPa切变线西侧的偏北气流越过马鬃山后也处于南部山区的迎风坡(图2c、8d),地形能增强迎风坡的上升运动(朱素行等,2010;陈豫英等,2018),有利于触发肃北附近对流系统的发生发展。因此,在高原低涡中心有较强辐合上升运动(图8a、8b)的背景下,地面风速辐合和地形抬升进一步增强了上升运动,触发局地的对流系统。

2.4.3 涡旋云系演变

暴雨区受高原低涡形成的涡旋云系头部的持续影响,形成了较长时间的层积混合云降水。15日14时水汽云图上青海西北部有暗区,说明有冷空气侵入,冷湖和茫崖附近出现对流性降水。15日20时(图3a),冷空气侵入缺口向北至肃北,异常偏东气流引导的暖湿空气也达到河西走廊西部,冷暖空气交汇,大气斜压性增强,涡旋云系初步形成,云头覆盖在肃北附近,云顶亮温 $< -60^{\circ}\text{C}$,肃北降水强度达 $7\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 。16日02—08时,冷空气侵入形成的弧状暗区边界更加清晰(图3d),冷空气侵入的加强有利于低涡的发展(陈春艳等,2012)。涡旋云系增强并稳定维持,云头仍位于暴雨区上空,敦煌附近云

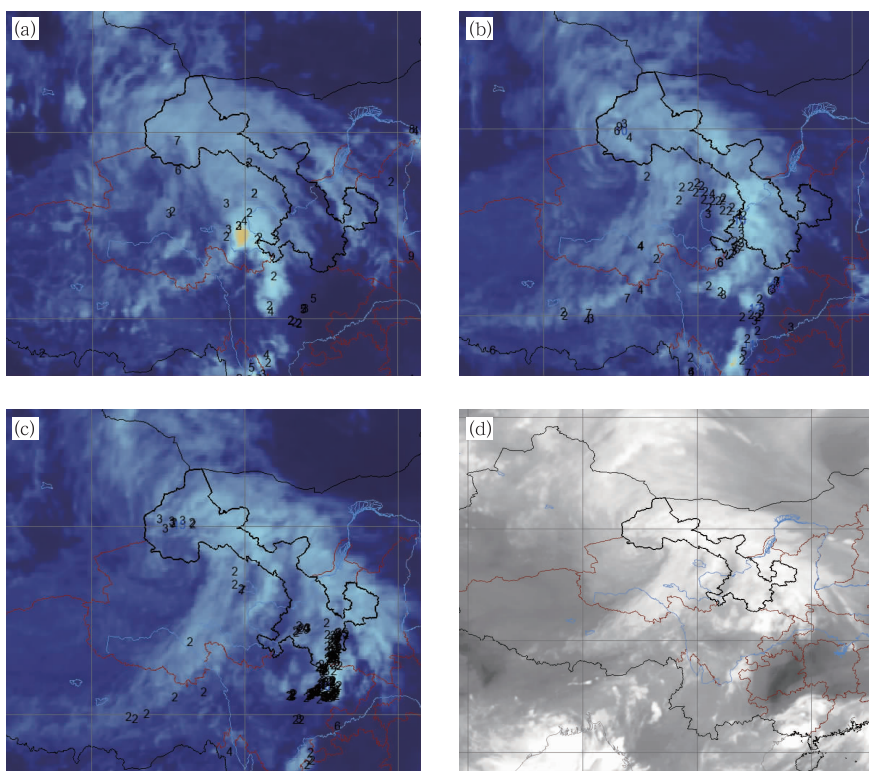


图3 2011年6月15—16日FY-2D(a,b,c)红外云图,(d)水汽云图

和对应云图时间的过去1 h降水量(≥ 2 mm)

(a)15日20时,(b)16日02时,(c,d)16日08时

Fig. 3 FY-2D (a, b, c) infrared images, (d) water vapor images

and hourly precipitation (≥ 2 mm) at (a) 20:00 BT 15,

(b) 02:00 BT 16, (c, d) 08:00 BT 16 June 2011

顶亮温 $< -70^{\circ}\text{C}$,有约200 km尺度的中尺度对流系统发展(图3b、3c),南湖雨量站6 h内降水量达42.6 mm,最大小时雨强达 $17.8\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 。16日14时,涡旋云系结构松散,东移减弱。

3 天气尺度水汽输送

3.1 水汽输送

充足的水汽供应是暴雨产生的必要条件。从整层水汽通量积分和整层水汽通量散度积分分布(图4),可知暴雨期间主要存在两条水汽通量大值带,一条是随西风气流的西路水汽输送带,另一条是绕高原的东路水汽输送带。水汽云图上河西走廊西部附近也没有近乎黑色灰度的动力干带/点(许健民和方宗义,2008)存在(图3d),即暴雨区没有明显的干侵入,说明偏东风和偏西风均携带水汽向暴雨区输送,且绕高原的东路水汽带明显强于西路水汽带。

进一步详细分析水汽输送的演变情况,15日08时,对流层中高层的偏南气流将孟加拉湾的水汽通过青藏高原中东部输送到河西走廊西部,输送强度较弱,不足 $6\text{ g}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ 。15日20时(图4a),青藏高原东侧的偏南气流将对流层中、低层来自孟加拉湾的暖湿空气向北输送到西北地区东部后,在异常偏东气流的继续引导下,沿高原东北侧分两支向河西走廊西部输送,完整的东路水汽输送通道建立,暴雨区东边界水汽通量为 $10\text{ g}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ 。同时,西路水汽通量也增强至 $12\text{ g}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$,在肃北上空形成较强的水汽辐合区,水汽通量散度值为 $-8\times 10^{-5}\text{ g}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$,暴雨区降水强度显著增强。16日02时(图4b),水汽辐合中心位于敦煌至肃北,水汽通量散度为 $-11\times 10^{-5}\text{ g}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 。随着异常偏东气流风速的增大,东路水汽通量增强至 $20\text{ g}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$,是西路水汽通量的1.5倍(图4c),这种强度的东路水汽输送带十分罕见。上述分析可知,暴雨前期以西路水汽输送为主,中后期东路水汽

输送明显强于西路,东西两路输送的水汽在河西走廊西部辐合。

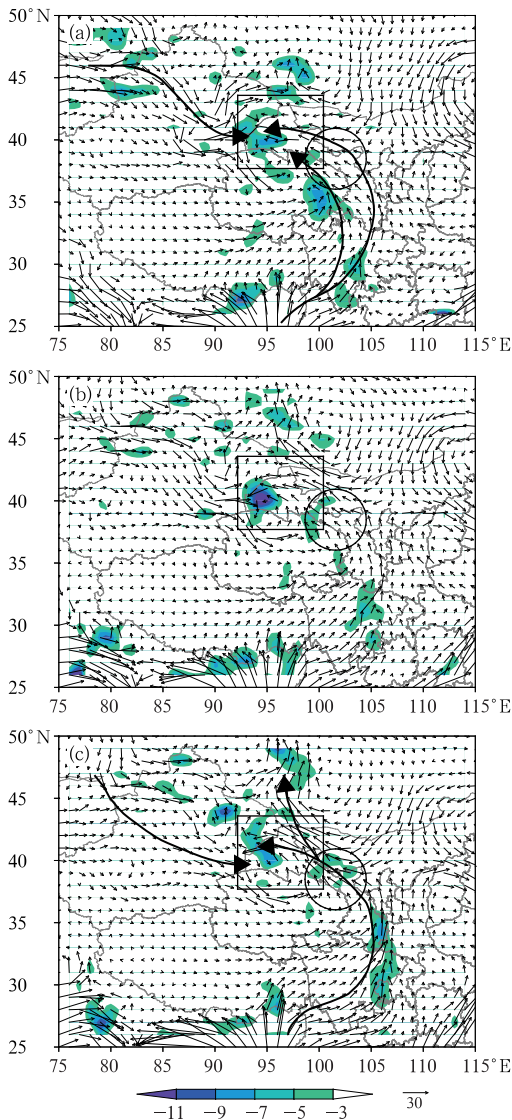


图 4 2011 年 6 月 (a) 15 日 20 时、(b) 16 日 02 时、(c) 16 日 08 时地面至 300 hPa 的水汽通量垂直积分 (箭头, 单位: $\text{g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$) 和水汽通量散度垂直积分 (填色, 单位: $10^{-5} \text{g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) (方框表示河西走廊西部, 圆圈表示异常偏东气流区, 粗长箭头为水汽输送示意路径)

Fig. 4 Vertical integral of water vapor flux (arrow, unit: $\text{g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$) and water vapor flux divergence (colored, unit: $10^{-5} \text{g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) from surface to 300 hPa at (a) 20:00 BT 15, (b) 02:00 BT 16, and (c) 08:00 BT 16 June 2011 (The framed area is western Hexi Corridor, the circle area is abnormal easterlies area, and the thick and long arrows indicate water vapor transport path)

3.2 水汽追踪

从敦煌的水汽质点后向 240 h 的追踪轨迹 (图 5) 可知,暴雨区的水汽主要来自东、西两路。东路水汽质点从青藏高原东侧的对流层低层绕高原向河西走廊西部输送时,受天气系统和地形升高的影响,水汽质点高度不断上升,最后以对流层中层的高度输送到暴雨区。西路水汽以对流层低层的高度输入到暴雨区。后向轨迹追踪水汽来源方向的结果与水汽输送路径分析结论一致。

4 中尺度水汽收支和水汽辐合

4.1 水汽收支

从暴雨区各边界对流层整层的水汽收支演变 (图 6) 可知,从 14 日 08:00 开始有弱的水汽净输入,到降水开始时水汽净输入已维持了 30 h,平均强度为 $16.03 \times 10^6 \text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$,使得该地区的水汽积累已经比较充沛。15 日 14:00 水汽净输入强度增强至 $28.80 \times 10^6 \text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$,达到了前期平均净输入强度的 1.80 倍,16 日凌晨暴雨强盛时段 ($53.43 \times 10^6 \text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$) 增加至 3.33 倍。15 日 14:00 至 16 日 14:00 整个暴雨期间的平均水汽净输入强度为 $43.75 \times 10^6 \text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$,是前期平均净输入强度的

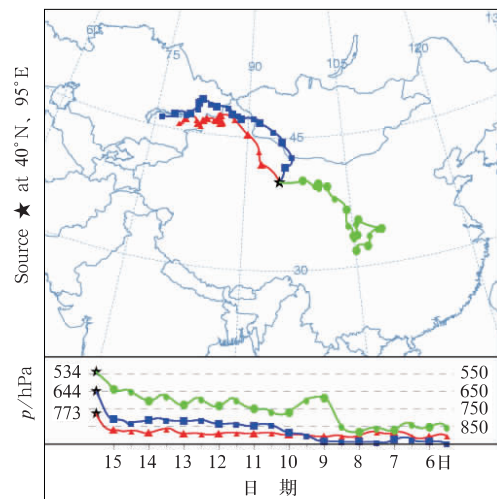


图 5 2011 年 6 月 15 日 20 时敦煌后向 240 h 的水汽质点轨迹
Fig. 5 The 240 h backward vapor track of Dunhuang Meteorological Station at 20:00 BT 15 June 2011

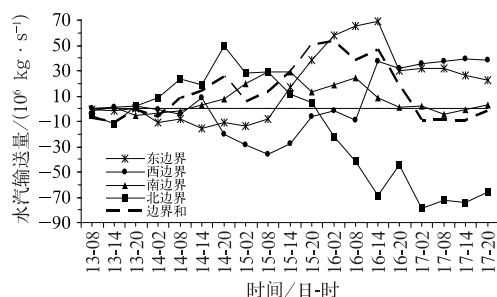


图6 2011年6月13日08时至17日20时河西走廊西部的东(星号)、西(圆点)、南(三角形)、北(正方形)边界的对流层整层及四个边界之和(虚线)逐6 h间隔水汽收支演变

Fig. 6 Variation of water vapor budget quantities for the whole troposphere on the east (asterisk), west (circular point), south (triangle), and north (square) borders and sum of the four borders (dashed line) with time intervals of 6 h from 08:00 BT 13 to 20:00 BT 17 June 2011

2.73 倍,河西走廊西部较强的水汽净输入为暴雨的发生提供了源源不断的水汽供应,水汽强净输入时段与暴雨发生时段相一致。

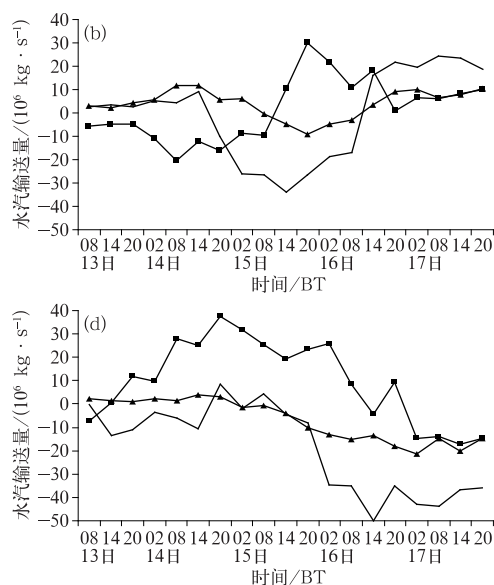
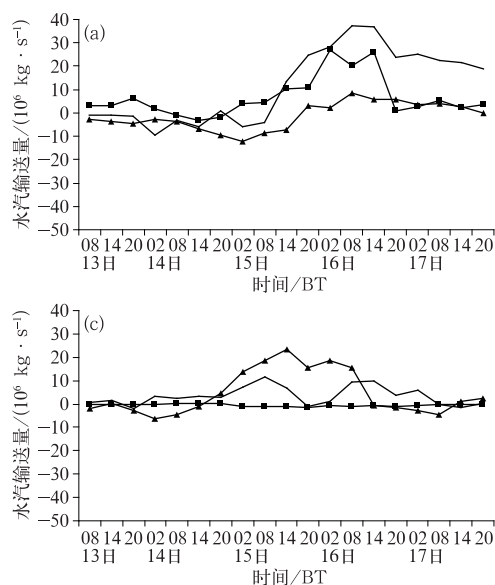


图7 2011年6月13日08时至17日20时河西走廊西部的(a)东、(b)西、(c)南、(d)北边界的对流层高层(三角形)、中层(实线)、低层(正方形)逐6 h间隔水汽收支演变

Fig. 7 Variation of water vapor budget quantities on the (a) east, (b) west, (c) south, and (d) north borders of western Hexi Corridor at the upper (triangle), middle (solid line) and lower (square) of troposphere with time intervals of 6 h from 08:00 BT 13 to 20:00 BT 17 June 2011

将东、西、南、北四个边界的水汽收支量分别除以四个边界水汽收支量代数和可得各个边界向暴雨区的水汽输送贡献率,正贡献率表示有水汽净输入,负贡献率表示有水汽净输出。整个暴雨期间,东、西、南、北四个边界的水汽输送贡献率分别为 111.61%、15.40%、40.00%、-67.01%。根据水汽输送通道(图4)可知,东路水汽输送主要从东、南两个边界输入,从北边界输出;而西路水汽输送主要是从西边界进入暴雨区。因而,东路水汽输送的贡献率为东、南、北三个边界的代数和,达 84.60%,远高于西路水汽输送的贡献率(15.40%)。东路水汽输入主要位于 500 hPa 以下,以中层水汽输入最强,且在暴雨时段呈不断增强的趋势(图7a)。700 hPa 以下以西、北两边界的水汽输入为主(图7b、7d)。南边界弱的水汽输入主要发生在对流层高层(图7c),因受青藏高原地形阻挡,低层无水汽输入。

4.2 水汽辐合

从水汽通量和水汽通量散度(图8a、8b)可以看出,强水汽辐合区位于高原低涡中心附近的暴雨区,辐合中心与暴雨区有很好的对应关系,水汽在 200~400 km 的 β 中尺度范围内强烈聚集形成了暴

雨区比周边区域更好的水汽条件。

从水汽辐合垂直分布来看,在 550、700、800 hPa 附近有三层辐合中心(图 8c),水汽通量散度分别是 -3×10^{-7} 、 -4×10^{-7} 和 $-6 \times 10^{-7} \text{ g} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1}$,水汽辐合主要位于 500 hPa 以下,越到对流层低层水汽辐合越强。进一步分析各层的水汽通量和水汽通量散度,800 hPa 以下的水汽辐合主要是由对流层低层的偏西气流的风速辐合和地形迎风坡(图 8c、9c)共同作用而形成;风向辐合(图 8c、8d)和南高北低的地形迎风坡(图 8b)形成了 700 hPa 的

水汽辐合中心;550 hPa 的水汽辐合中心是由高原低涡中心形成的(图 8a)。

4.3 大气可降水量

暴雨发生前上游新疆东部因前期普遍出现降水,大气可降水量(PW)超过 24 mm,局地超过 40 mm(图 9a),对流层低层的比湿超过 $10 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,偏西风速为 $8 \sim 15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (图 9c),有利于新疆东部偏西气流向暴雨区输送水汽,从而暴雨区的 PW 和对流层低层比湿在暴雨发生前有明显陡升趋

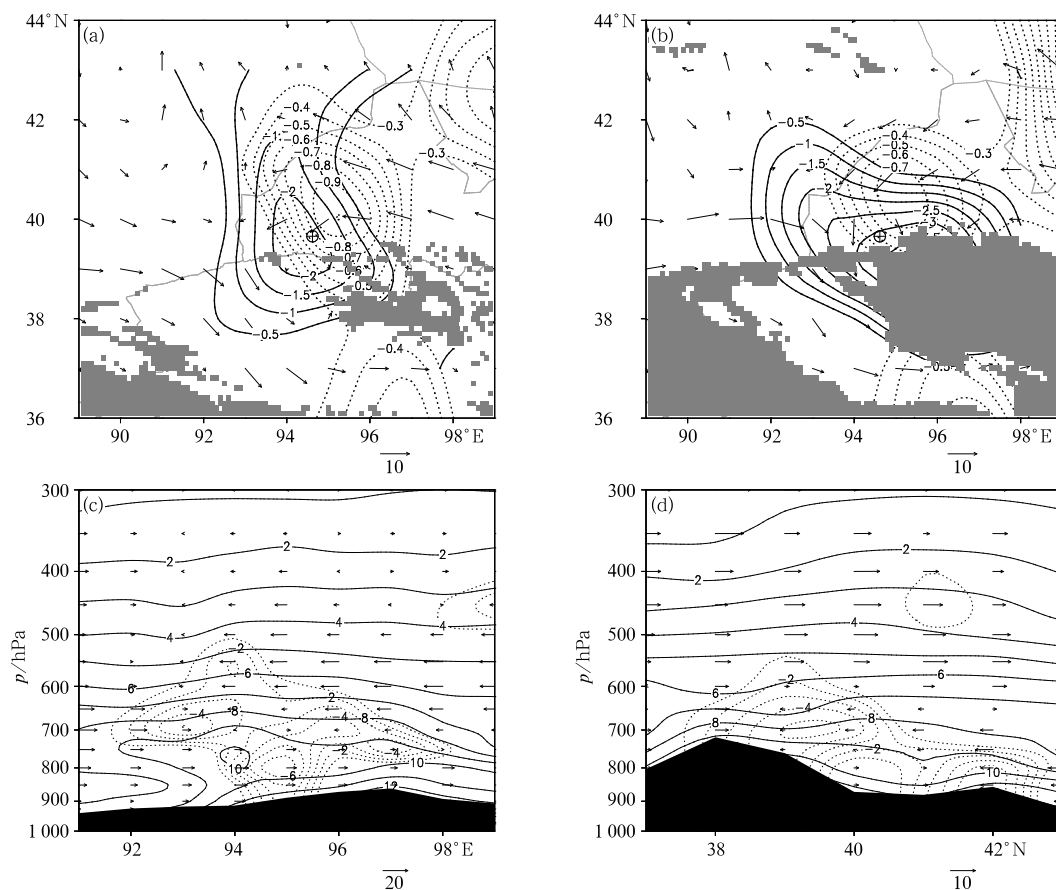


图 8 2011 年 6 月 16 日 02 时(a)600 hPa、(b)700 hPa 水汽通量(箭头,单位: $\text{g} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1}$)、水汽通量散度(实线,单位: $10^{-7} \text{ g} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1}$)和垂直速度(虚线,单位: $\text{Pa} \cdot \text{s}^{-1}$),
(c)沿 39.5°N 和(d)沿 96°E 水汽通量散度(虚线,单位: $10^{-7} \text{ g} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1}$)、比湿(实线,单位: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)、水平风场的垂直剖面
($\oplus$ 为暴雨中心,暴雨区位于 $38^\circ \sim 41^\circ\text{N}$ 、 $93^\circ \sim 96^\circ\text{E}$,图 8c、8d 中阴影为地形)

Fig. 8 The water vapor flux (arrow, unit: $\text{g} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1}$) and its divergence (solid contour, unit: $10^{-7} \text{ g} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1}$) and vertical velocity (dashed contour, unit: $\text{Pa} \cdot \text{s}^{-1}$) at (a) 600 hPa and (b) 700 hPa, vertical sections of water vapor flux divergence (dashed contour, unit: $10^{-7} \text{ g} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1}$), specific humidity (solid contour, unit: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$) and horizontal wind field along (c) 39.5°N and (d) 96°E at 02:00 BT 16 June 2011 ($\oplus$ is the center of rainstorm, the rainstorm area lies in $38^\circ \sim 41^\circ\text{N}$, $93.5^\circ \sim 96^\circ\text{E}$ in Figs. 8a, 8b, and shadow is terrain in Figs. 8c, 8d)

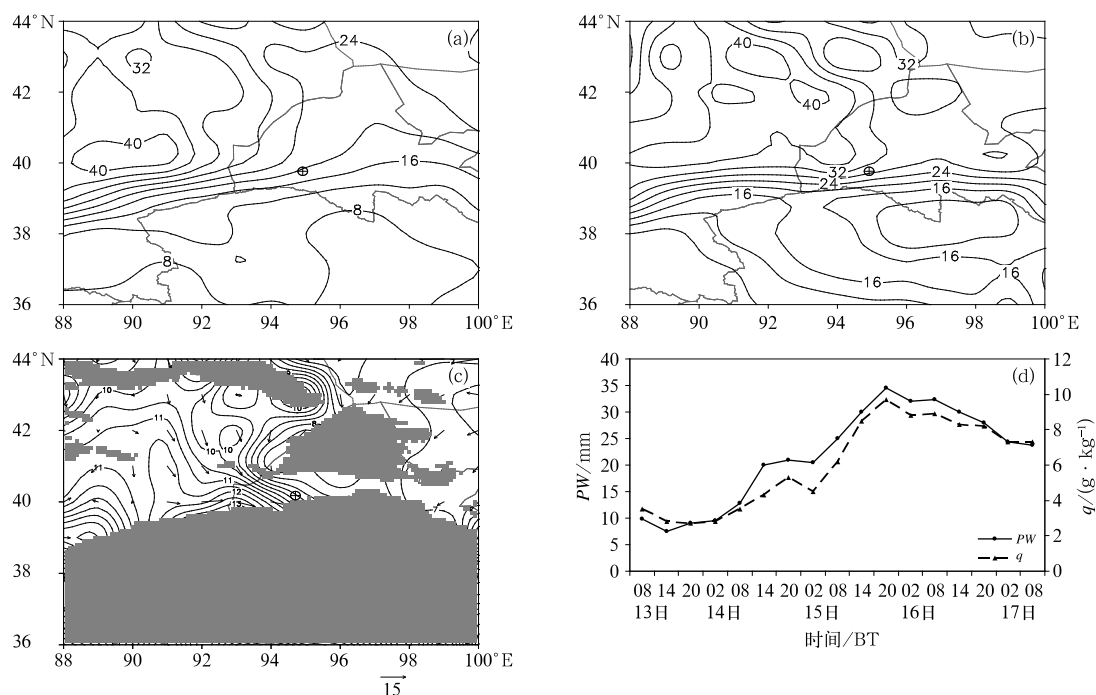


图9 2011年6月(a)15日08时、(b)16日02时大气可降水量(单位:mm),
(c)15日08时850 hPa比湿(等值线,单位: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)和风场(单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$),
(d)13日08时至17日08时肃北的大气可降水量和700 hPa比湿逐6 h间隔演变
(图9c中阴影为地形,图9a,9b,9c中⊕为暴雨中心)

Fig. 9 Distribution of atmospheric precipitable water (unit: mm) at 08:00 BT 15 (a) and 02:00 BT 16 (b), (c) specific humidity (contour, unit: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$) and wind field (unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) at 850 hPa at 08:00 BT 15, (d) variation of specific humidity at 700 hPa and precipitable water at Subei Meteorological Station with time intervals of 6 h from 08:00 BT 13 to 08:00 BT 17 June 2011 (Shadow is terrain in Fig. 9c, and ⊕ is the center of rainstorm in Figs. 9a, 9b, 9c)

势(图9d),之后大值时段与强降水发生时段吻合。

15日14时降水开始时,河西走廊西部PW为16~32 mm。随着东、西两路水汽输送强度和水汽辐合强度的增加,16日02时,暴雨区PW均超过20 mm(图9b),暴雨中心肃北最大值达到了34 mm(图9d),是该地区夏季平均值10~15 mm(李江林等,2012)的2倍多。河西走廊西部地区700 hPa比湿夏季均值为3~4 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$,而此次暴雨该地区比湿超过8 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ (图8c),达到了西北地区东部暴雨乃至我国东部地区暴雨所要求的700 hPa比湿阈值。

5 结论与讨论

(1)内蒙古西部到河套地区西北—东南向异常

高压西部形成的高原低涡是此次天气过程主要的影响系统。高原低涡中心直接影响暴雨区,尺度为200~400 km,其受异常高压的阻挡稳定维持在暴雨区上空超过12 h。对流层低层增湿降温使大气趋于饱和,从高原低涡南部侵入的冷空气引起中层降温弥补低层降温对形成不稳定层结的不利影响,大气处于弱不稳定状态。地面风速辐合和地形抬升进一步增强了高原低涡中心辐合上升运动,触发局地的对流系统,形成暴雨区较长时间的层积混合云降水,造成极端的小时降水量和累积降水量。

(2)异常高压和高原低涡相互作用形成的甘肃中部异常偏东气流在500和700 hPa等压面上的风向和风速具有显著异常特征,500 hPa风向与6月平均风向相反,700 hPa风速偏强。异常偏东气流能将已到达西北地区东部的暖湿空气继续向西北方

向输送从而到达河西走廊西部,对东路水汽输送通道的形成十分重要。

(3)主要存在两条水汽输送带:随西风气流的西路水汽输送带和绕高原的东路水汽输送带。暴雨前期以西路水汽输送为主,中后期东路水汽输送明显强于西路。整个暴雨时段,东路水汽输送的贡献率高达 84.6%,西路水汽输送贡献率仅为 15.4%。东路的水汽输送以对流层中层输入最为显著,西路的水汽输送以对流层低层输入最为显著。

(4)暴雨期间河西走廊西部水汽平均净输入强度是前期的 2.73 倍,显著增强的水汽输送受对流层中层高原低涡中心、对流层低层风速风向辐合和地形辐合等作用,造成暴雨区的水汽辐合明显强于周边区域,在 550、700、800 hPa 有三层 200~400 km 尺度的强水汽辐合中心。暴雨期间 PW 和 700 hPa 比湿明显陡升,分别高达 34 mm 和超过 $8 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,是该地区夏季平均值的 2 倍多。

本文只是对河西走廊西部干旱区的一次极端暴雨天气进行了成因诊断和水汽特征分析,使预报员初步认识与气候背景存在显著差异的东路水汽输送的重要性以及相关水汽收支特征、指标。进一步深入研究干旱区暴雨的天气形势特征和水汽特征还需要利用近几年的高时空分辨率观测资料进行大量的天气个例诊断分析、数值模拟以及与非干旱区暴雨对比分析等工作。

参考文献

- 白肇烨,徐国昌,孙学筠,等,1991. 中国西北天气[M]. 北京:气象出版社:202-254. Bai Z Y, Xu G C, Sun X J, et al, 1991. Weather of Northwest China[M]. Beijing: China Meteorological Press: 202-254(in Chinese).
- 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[J]. 气象,38(1):72-80. Chen C Y, Kong Q, Li R Q, 2012. Analysis of a major rainstorm in the north slope of Tianshan Mountains[J]. Meteor Mon, 38(1):72-80(in Chinese).
- 陈红专,叶成志,陈静静,等,2019. 2017 年盛夏湖南持续性暴雨过程的水汽输送和收支特征分析[J]. 气象,45(9):1213-1226. Chen H Z, Ye C Z, Chen J J, et al, 2019. Analysis of water vapor transport and budget during persistent heavy rainfall over Hunan Province in June 2017[J]. Meteor Mon, 45(9):1213-1226(in Chinese).
- 陈豫英,陈楠,任小芳,等,2018. 贺兰山东麓罕见特大暴雨的预报偏差和可预报性分析[J]. 气象,44(1):159-169. Chen Y Y, Chen N, Ren X F, et al, 2018. Analysis on forecast deviation and predictability of a rare severe rainstorm along the eastern Helan Mountain[J]. Meteor Mon, 44(1):159-169(in Chinese).
- 葛其方,1983. 我国最干旱的地区及其洪水灾害[J]. 气象,9(6):34-35. Ge Q F, 1983. The driest areas in China and their flood disasters[J]. Meteor Mon, 9(6):34-35(in Chinese).
- 何金海,刘芸芸,常越,2005. 西北地区夏季降水异常及其水汽输送和环流特征分析[J]. 干旱气象,23(1):10-16. He J H, Liu Y Y, Chang Y, 2005. Analysis of summer precipitation anomaly and the feature of water vapor transport and circulation in Northwest China[J]. J Arid Meteor, 23(1):10-16(in Chinese).
- 黄荣辉,陈际龙,2010. 我国东、西部夏季水汽输送特征及其差异[J]. 大气科学,34(6):1035-1045. Huang R H, Chen J L, 2010. Characteristics of the summertime water vapor transports over the eastern part of China and those over the western part of China and their difference[J]. Chin J Atmos Sci, 34(6):1035-1045(in Chinese).
- 黄小燕,王圣杰,王小平,2018. 1960—2015 年中国西北地区大气可降水量变化特征[J]. 气象,44(9):1191-1199. Huang X Y, Wang S J, Wang X P, 2018. Variations of precipitable water in Northwest China during 1960—2015[J]. Meteor Mon, 44(9):1191-1199(in Chinese).
- 黄玉霞,李栋梁,王宝鉴,2004. 西北地区近 40 年年降水异常的时空特征分析[J]. 高原气象,23(2):245-252. Huang Y X, Li D L, Wang B J, 2004. Analyses on temporal-spatial features of annual precipitation in Northwest China in 1961—2000[J]. Plateau Meteor, 23(2):245-252(in Chinese).
- 孔祥伟,陶健红,2012. 近 51a 甘肃夏季气温和降水极端事件变化[J]. 干旱区研究,29(6):965-971. Kong X W, Tao J H, 2012. Change of extreme temperature and precipitation events in Gansu Province in summer in recent 51 years[J]. Arid Zone Res, 29(6):965-971(in Chinese).
- 孔祥伟,陶健红,刘治国,等,2015. 河西走廊中西部干旱区极端暴雨个例分析[J]. 高原气象,34(1):70-81. Kong X W, Tao J H, Liu Z G, et al, 2015. Case analysis of extreme rainstorm in arid zone of the midwestern Gansu Corridor[J]. Plateau Meteor, 34(1):70-81(in Chinese).
- 李江林,李照荣,杨建才,等,2012. 近 10 年夏季西北地区水汽空间分布和时间变化分析[J]. 高原气象,31(6):1574-1581. Li J L, Li Z R, Yang J C, et al, 2012. Analyses on spatial distribution and temporal variation of atmosphere water vapor over Northwest China in summer of later 10 years[J]. Plateau Meteor, 31(6):1574-1581(in Chinese).
- 李江林,余晔,王宝鉴,等,2014. 河西西部一次大到暴雨过程诊断及数值模拟[J]. 高原气象,33(4):1034-1044. Li J L, Yu Y, Wang B J, et al, 2014. Analysis of heavy rain to rainstorm event on the west of the Gansu Corridor[J]. Plateau Meteor, 33(4):1034-1044(in Chinese).
- 李江萍,杜亮亮,张宇,等,2012. 玛曲地区夏季强降水的环流分型及水汽轨迹分析[J]. 高原气象,31(6):1582-1590. Li J P, Du L L,

- Zhang Y, et al, 2012. Analysis on circulation pattern and water vapor source of heavy precipitation in Maqu Region[J]. Plateau Meteor, 31(6):1582-1590(in Chinese).
- 李文莉, 王宝鉴, 吉惠敏, 等, 2013. 河西干旱区短时强降水过程的中尺度分析[J]. 干旱气象, 31(2):318-326. Li W L, Wang B J, Ji H M, et al, 2013. Mesoscale analysis of heavy rainfall process in Hexi Arid Area in Gansu Province[J]. J Arid Meteor, 31(2):318-326(in Chinese).
- 刘世祥, 杨建才, 陈学君, 等, 2005. 甘肃省空中水汽含量、水汽输送的时空分布特征[J]. 气象, 31(1):50-54. Liu S X, Yang J C, Chen X J, et al, 2005. The temporal-spatial distribution of vapor content and vapor transportation of Gansu Province[J]. Meteor Mon, 31(1):50-54(in Chinese).
- 栾晨, 宋敏红, 蔡英, 等, 2012. 西北区西部夏半年强降水分布与变化特征[J]. 高原气象, 31(3):629-637. Luan C, Song M H, Cai Y, et al, 2012. Distribution and change feature of intense precipitation in the west part of Northwestern China during summer half years[J]. Plateau Meteor, 31(3):629-637(in Chinese).
- 马京津, 高晓清, 2006. 华北地区夏季平均水汽输送通量和轨迹的分析[J]. 高原气象, 25(5):893-899. Ma J J, Gao X Q, 2006. The transportation paths of water vapor and its relation to climate change over North China[J]. Plateau Meteor, 25(5):893-899(in Chinese).
- 苗秋菊, 徐祥德, 施小英, 2004. 青藏高原周边异常多雨中心及其水汽输送通道[J]. 气象, 30(12):44-47. Miao Q J, Xu X D, Shi X Y, 2004. Water vapor transport structure of anomalous rainy centers in the ambient area of Tibetan Plateau[J]. Meteor Mon, 30(12):44-47(in Chinese).
- 王伏村, 吴晓京, 付双喜, 等, 2013. 敦煌地区“6·16”暴雨的热力和动力特征[J]. 干旱区研究, 30(1):56-66. Wang F C, Wu X J, Fu S X, et al, 2013. Analysis on characteristics of a rainstorm occurred in Dunhuang on June 16, 2011[J]. Arid Zone Res, 30(1):56-66(in Chinese).
- 王佳津, 王春学, 陈朝平, 等, 2015. 基于 HYSPLIT4 的一次四川盆地夏季暴雨水汽路径和源地分析[J]. 气象, 41(11):1315-1327. Wang J J, Wang C X, Chen C P, et al, 2015. Analysis of a summer rainstorm water vapor paths and sources in Sichuan Basin based on HYSPLIT4 model[J]. Meteor Mon, 41(11):1315-1327(in Chinese).
- 王可丽, 江灏, 赵红岩, 2005. 西风带与季风对中国西北地区的水汽输送[J]. 水科学进展, 16(3):432-438. Wang K L, Jiang H, Zhao H Y, 2005. Atmospheric water vapor transport from westerly and monsoon over the Northwest China[J]. Adv Water Sci, 16(3):432-438(in Chinese).
- 王荣喆, 钱莉, 钱沛泉, 2015. 河西走廊东部暴雨气候特征及天气特征[J]. 干旱区研究, 32(1):102-107. Wang R Z, Qian L, Qian P Q, 2015. Characteristics of rainstorm climatic conditions in the eastern Hexi Corridor[J]. Arid Zone Res, 32(1):102-107(in Chinese).
- 王田田, 高晓清, 高艳红, 等, 2014. 酒泉地区 20120604 暴雨的诊断分析[J]. 高原气象, 33(2):504-514. Wang T T, Gao X Q, Gao Y H, et al, 2014. Diagnostic analysis of rainstorm occurred in Jiuquan of Gansu Province on 4 June 2012[J]. Plateau Meteor, 33(2):504-514(in Chinese).
- 王秀荣, 徐祥德, 王维国, 2007. 西北地区春、夏季降水的水汽输送特征[J]. 高原气象, 26(4):749-758. Wang X R, Xu X D, Wang W G, 2007. Characteristic of spatial transportation of water vapor for Northwest China's rainfall in spring and summer[J]. Plateau Meteor, 26(4):749-758(in Chinese).
- 《西北暴雨》编写组, 1992. 西北暴雨[M]. 北京:气象出版社:1-24. Editing Group for Northwest China's Rainstorms, 1992. Rainstorms in Northwest China[M]. Beijing: China Meteorological Press:1-24(in Chinese).
- 许健民, 方宗义, 2008. 《卫星水汽图像和位势涡度场在天气分析和预报中的应用》导读[J]. 气象, 34(5):3-8. Xu J M, Fang Z Y, 2008. Book comment and introduction to 《Weather Analysis and Forecasting, Applying Satellite Water Vapor Imagery and Potential Vorticity Analysis》[J]. Meteor Mon, 34(5):3-8(in Chinese).
- 杨莲梅, 张惠惠, 汤浩, 2012. 2007 年 7 月新疆三次暴雨过程的水汽特征分析[J]. 高原气象, 31(4):963-973. Yang L M, Zhang Y H, Tang H, 2012. Analyses on water vapor characteristics in three heavy rainstorm processes of Xinjiang in July 2007[J]. Plateau Meteor, 31(4):963-973(in Chinese).
- 俞亚勋, 王宝灵, 董安祥, 2000. 西北地区大气水分和水汽平均输送特征[M]//谢金南. 中国西北干旱气候变化与预测研究(一). 北京:气象出版社:201-227. Yu Y X, Wang B L, Dong A X, 2000. The transport characteristics of atmospheric water and water vapor in Northwest China[M]//Xie J N. Study on Arid Climate Change and Prediction in Northwest China (1). Beijing: China Meteorological Press:201-227(in Chinese).
- 朱素行, 徐海明, 徐蜜蜜, 2010. 亚洲夏季风区中尺度地形降水结构及分布特征[J]. 大气科学, 34(1):71-82. Zhu S X, Xu H M, Xu M M, 2010. Structure and distribution of rainfall over mesoscale mountains in the Asian summer monsoon region[J]. Chin J Atmos Sci, 34(1):71-82(in Chinese).
- Draxler R R, Hess G D, 1998. An overview of the HYSPLIT-4 modelling system for trajectories, dispersion and deposition[J]. Aust Meteor Mag, 47(4):295-308.