

刘晶,杨莲梅,2017. 一次中亚低涡造成的天山北坡暴雨 GPS 大气水汽总量演变特征[J]. 气象,43(6):724-734.

# 一次中亚低涡造成的天山北坡暴雨 GPS 大气水汽总量演变特征<sup>\*</sup>

刘 晶<sup>1,2</sup> 杨莲梅<sup>1,2</sup>

1 中国气象局乌鲁木齐沙漠气象研究所,乌鲁木齐 830002

2 中亚大气科学研究中心,乌鲁木齐 830002

**提 要:** 2015 年 6 月 26—28 日中亚低涡造成天山北坡出现暴雨天气,本文利用常规观测、NCEP 再分析资料及 9 站地基 GPS 遥感的大气水汽总量资料(GPS-PWV)对这次天气过程水汽特征进行深入研究,结果表明:(1)降水前,500 hPa 阿拉伯海水汽经青藏高原向中亚低涡输送,低涡增湿明显;降水期间,500 hPa 低涡向北移动并减弱成槽东移,700 hPa 孟加拉湾经四川盆地、河西走廊的偏东水汽输送通道建立,与低涡自身偏南(东南)气流在暴雨区上空汇合,暴雨区中低层增湿剧烈;(2)深厚低涡造成的强降水前测站 GPS-PWV 均存在 1~3 d 增湿过程和 1~2 次跃变过程,强降水发生前 GPS-PWV 跃变均超过 5 mm · (4 h)<sup>-1</sup>; (3)在同样水汽输送、辐合条件下,干旱区测站 GPS-PWV 急剧增幅越大,地面雨强越强,在一定程度上,水汽输送和水汽的辐合与 GPS 的剧增存在一定的对应关系;(4)中亚低涡造成的乌鲁木齐强降水发生前 4~5 h 的 GPS-PWV 增幅达到 4 mm 以上,GPS-PWV 峰值往往达到气候平均值 2 倍左右。

**关键词:** 中亚低涡,暴雨,地基 GPS,水汽接力输送

**中图分类号:** P458

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.7519/j.issn.1000-0526.2017.06.009

## Development Features of GPS Atmospheric Precipitable Water Vapor in Heavy Rainfall Caused by Central Asia Vortex on the North Slope of Tianshan Mountain

LIU Jing<sup>1,2</sup> YANG Lianmei<sup>1,2</sup>

1 Institute of Desert Meteorology, CMA, Urumqi 830002

2 Central-Asia Research Center of Atmospheric Science, Urumqi 830002

**Abstract:** From 26 to 28 June 2015, Central Asia vortex caused heavy rainfall in the north slope of Tianshan Mountain. Using conventional data, NCEP reanalysis data and 9 weather stations' GPS precipitable water vapor (GPS-PWV) observations from the ground-based GPS networks, this article did in-depth analysis on the vapor features in this process. The results show that: (1) before precipitation, at 500 hPa, the water vapor of the Arabian Sea was transported to Central Asia vortex through the Tibetan Plateau, the vortex was obviously moistened; during precipitation, at 700 hPa, the eastward water vapor transport channel was established, which was from Bay of Bengal through the Sichuan Basin and Hexi Corridor, and the easterly airflow and the southerly (SE) airflow of vortex itself converged the vapor in the heavy rain area. So, the lower atmosphere rapidly moistened in the heavy rain area. (2) All stations GPS-PWV experienced wetting process from one to three days, the water jumped once or twice before precipitation began

<sup>\*</sup> 公益性行业(气象)科研专项(GYHY201506009)、国家自然科学基金项目(41565003)和国家青年科学基金项目(41505025)共同资助

2016 年 7 月 26 日收稿; 2017 年 3 月 17 日收修定稿

第一作者:刘晶,主要从事灾害性天气研究. Email:994365768@qq.com

通信作者:杨莲梅,从事灾害性天气研究. Email:yanglm@idm.cn

caused by the deep low vortex, and GPS PWV jumped more than  $5 \text{ mm} \cdot (4 \text{ h})^{-1}$ . (3) Under the same water vapor transport and vapor convergence conditions, the stronger the GPS-PWV at stations of arid areas surges, the stronger the rain intensity is. To a certain extent, the water vapor transport and convergence has certain corresponding relationship with GPS-PWV surge. (4) In 4–5 h before the heavy rainfall in Urumqi caused by Central Asia vortex occurred the growth rate of GPS-PWV reached more than  $4 \text{ mm}$ , and the peak value of GPS-PWV was almost twice of climatic mean.

**Key words:** Central Asia vortex, heavy rainfall, ground-based GPS, water vapor relay transport

## 引 言

暴雨的发生发展需要特殊的环流形势,水汽更是产生暴雨的必要条件。地基 GPS 遥感大气水汽技术是 20 世纪 90 年代发展起来的一种全新的大气观测手段。应用 GPS 技术遥感大气水汽总量,可为天气和气候模式提供重要的水汽信息(丁金才等, 2006; 2007; 李成才和毛节泰, 1998; Businger and Chiswell, 1996; Duan et al, 1996; 王继竹等, 2014), 从而更好诊断分析暴雨期间水汽精细变化。

近些年,国内外许多气象工作者(李延兴等, 2001; 曹云昌等, 2005; 楚艳丽等, 2007; 万蓉等, 2015; 姚建群等, 2005; 杨晓霞等, 2012; 张端禹等, 2010; 张晶等, 2014; 朱丰等, 2014)均利用连续、高时空分辨率的大气可降水量进行局地降水预报分析,研究表明,大气可降水量(GPS-PWV)与降水过程关系密切,且降水量与大气水汽总量激增有较好关系,当 GPS-PWV 超过一定阈值后,对应地面会有降水发生,也有分析(陈娇娜等, 2009)认为降水总是发生在 GPS 水汽高值与温度露点差低值阶段,两者有较好的关系。这些研究均表明大气水汽总量与天气系统和降水过程中水汽的演变存在密切的关系,并且水汽前期演变对降水的产生具有一定的指示意义。

新疆处于欧亚大陆腹地的中纬度干旱、半干旱区,水汽相对匮乏,每年夏季均会出现不同程度的暴雨过程,降水变率大,局部地区还常会有暴雨发生。已有大量研究(薛燕等, 2003; 杨莲梅, 2003; 史玉光和孙照渤, 2008; 辛渝等, 2008; 戴新刚等, 2006; 施雅风等, 2003; 黄玉霞等, 2004; 姜逢清等, 2002; 张云惠等, 2015; 张俊兰, 2011; 陈春艳等, 2012)表明水汽是影响干旱区暴雨形成的关键因素之一,为了对新疆上空水汽精细化特征有进一步认识,新疆气象学者(杨莲梅等, 2012; 李曼等, 2014)也应用 GPS 大气可

降水量资料,针对本地暴雨过程进行分析,认为:GPS 能够较准确地从时间和空间上反映大气中水汽的特征,在低槽(短波)系统影响下,乌鲁木齐地区暴雨过程中 GPS-PWV 呈现出明显的 1~3 d 增湿过程和 1~2 次跃变过程,跃变过程与降水发生和结束有较好的关系,GPS-PWV 可以反映出暴雨天气过程中大气水汽总量的细致变化。相比低槽系统,中亚低涡生命史长达 3~7 d 左右,其稳定少动期间常以分裂短波的形式对新疆地区不断造成降水天气,后期减弱成槽东移仍能产生较大的雨强,造成局地的洪涝灾害。本文将重点就 2015 年 6 月 26—28 日一次中亚低涡造成的天山北坡暴雨过程中 GPS-PWV 的演变特征进行分析,探究中期时间尺度天气系统水汽输送、辐合及演变特征。

## 1 资料与方法

地基 GPS 遥感大气水汽技术是 20 世纪 90 年代发展起来的一种全新的大气观测手段,中国气象局乌鲁木齐沙漠气象研究所自 2003 年开始和美国大气研究大学协会(University Corporation for Atmospheric Research, UCAR)开展 GPS 大气可降水量探测的国家合作项目,目前,新疆共有 14 个气象观测站可收集、整理和传输本站的 GPS 资料,具体解算方法参考文献(赵玲等, 2006)。已有研究(赵玲等, 2010)将探空观测资料计算的大气可降水量和利用 GAMIT 软件处理反演得到 1 h 间隔的 GPS-PWV 进行对比分析,发现两者间的误差在  $\pm 2 \text{ mm}$  内,说明 GPS-PWV 具有较高的准确性,可作为描述水汽变化细节的有效手段,补充常规探空资料在时间和空间密度上的不足。

本文剔除由于仪器检修和缺测的 GPS 水汽数据,筛选利用乌鲁木齐、伊宁等 9 个测站(图 1)的逐时地基 GPS-PWV 水汽、地面自动站逐时降水、探空和 6 h 一次的  $1^\circ \times 1^\circ$  NCEP 再分析资料,对 2015

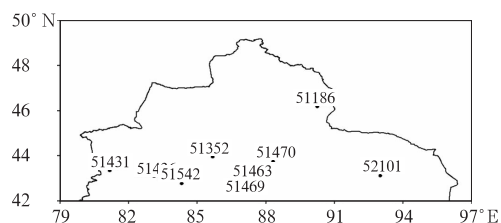


图 1 北疆 9 个地基 GPS-PWV 测站分布图

(51431—伊宁, 51436—新源,

51352—乌兰乌苏, 51542—巴音布鲁克,

51463—乌鲁木齐, 51469—牧试站,

51470—天池, 51186—清河, 52101—巴里坤)

Fig. 1 The distribution of nine ground-based

GPS-PWV stations in northern Xinjiang

(51431—Yining, 51436—Xinyuan, 51352—Ulanwusu,

51542—Bayinbuluk, 51463—Urumqi, 51469—Animal

Meteorological Experiment Station of Xinjiang,

51470—Tianchi, 51186—Qinggil, 52101—Barkol)

年 6 月 26—28 日天山北坡暴雨过程中 GPS-PWV 的演变特征进行分析, 探究在低涡背景下天山北坡暴雨过程水汽的演变特征。

## 2 天气过程概况及环流形势

### 2.1 降水实况

由于国家降水量级标准不适合干旱、半干旱气候背景的新疆地区, 因而新疆气象学者(张家宝等, 1986; 张家宝和邓子风, 1987; 肖开提·多莱特, 2005)提出更适合新疆气候特点的降水量级标准: 降

水量 0.1~6.0 mm 为小雨, 6.1~12.0 mm 为中雨, 12.1~24.0 mm 为大雨, >24.0 mm 为暴雨, >48.0 mm 为大暴雨。

2015 年 6 月 26—28 日, 北疆大部地区出现明显强降水过程(图 2a), 其中伊犁河谷、乌鲁木齐以东的北疆沿天山一带、阿勒泰东部出现暴雨, 伊犁河谷国家站 4 站出现大暴雨。低涡稳定期间(26 日 20 时至 27 日 18 时), 降水主要集中在伊犁河谷及西天山两侧地区, 河谷普遍出现暴雨, 巩留县在 26 日 08 时至 27 日 15 时降雨量达 104 mm, 突破有气象观测资料以来的历史极值。27 日 20 时低涡减弱成槽东移后, 降水区东移, 暴雨中心主要位于乌鲁木齐、天山山区及阿勒泰东部地区。从巩留和乌鲁木齐站逐时降水量演变图(图 2b)上可以看出, 巩留站降水主要集中在 27 日 02—14 时, 最大小时降水量达到 18.5 mm, 乌鲁木齐站降水出现在 27 日 20 时至 28 日 03 时, 28 日 00 时雨强达到最强为 10.1 mm · h<sup>-1</sup>, 本文将结合 GPS-PWV 资料分析 6 月 26 日 20 时至 28 日 08 时天山北坡强降水过程中的水汽输送、辐合和演变特征。

### 2.2 环流形势

27 日 08:00(图 3), 200 hPa 位势高度场上, 南亚高压两个中心分别位于红海和青藏高原东侧, 高原东侧高压脊脊顶北伸至 50°N 附近, 两高压脊之间的中亚地区形成长波槽, 这种两脊一槽的形势为大暴雨提供了稳定的环流背景。随着上游高压脊发展, 中亚长波槽向南加深形成气旋式闭合环流, 槽底

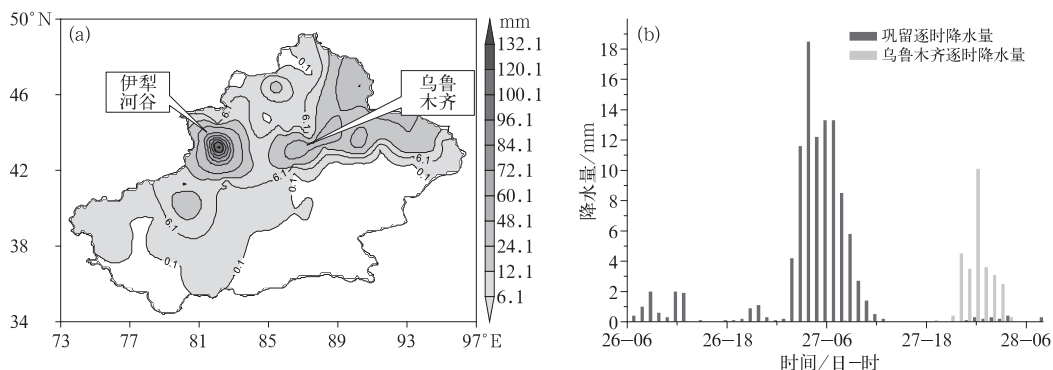


图 2 2015 年 6 月 26 日 08 时至 28 日 08 时(a)新疆降水实况图,

(b) 巩留和乌鲁木齐逐小时降水量(单位: mm)

Fig. 2 Observed precipitation diagram in Xinjiang (a) and

rainfall at Gongliu Station and Urumqi Station (b) during

08:00 BT 26—08:00 BT 28 June 2015 (unit: mm)

伸至  $30^{\circ}\text{N}$ , 槽前副热带西风急流强盛, 最大风速达  $45\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , 天山北坡正位于高空急流入口区左侧, 高空强烈的辐散抽吸为大暴雨提供了有利的动力条件。

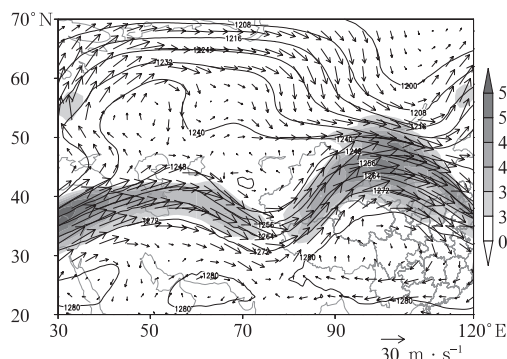


图3 2015年6月27日08时200 hPa位势高度场(等值线,单位:dagpm)和风场(阴影风速 $\geq 30\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ )

Fig. 3 The 200 hPa geopotential height (contour, unit: dagpm) and wind fields (shaded area for wind speed  $\geq 30\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) at 08:00 BT 27 June 2015

降水前, 24日14:00(图4a), 500 hPa位势高度场上, 高纬度上乌拉尔山为高压脊, 西伯利亚地区为宽广低槽区; 中低纬度伊朗高压、里海和咸海高压与乌拉尔山高压脊同位相叠加, 形成南北经向度达50个纬距的长波脊, 脊前中亚地区出现切断低涡即中亚低涡, 同时西太平洋副热带高压(以下简称副高)向西伸展至青藏高原东部, 588 dagpm线控制南疆盆地, 在中低纬度地区形成两脊一槽形势, 阿拉伯海到新疆西部的偏南气流将低纬度暖湿水汽输送至中亚低涡内部。26日20:00, 700 hPa风场上西太平洋副高西伸明显(图4c), 有一支自孟加拉湾—青藏高原东侧—河西走廊—伊犁河谷的偏东气流建立(张云惠等, 2015), 与低涡顶部偏东气流在伊犁河谷汇合, 河谷低层增湿明显, 伊宁站700 hPa比湿迅速增至  $7\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 850 hPa偏西气流和700 hPa偏东气流交汇于河谷上空, 配合河谷向西“喇叭口”地形, 低层辐合, 高层辐散, 垂直上升运动增强; 高空200 hPa西南急流、中空500 hPa东南气流、低空700 hPa偏东气流, 高低空三支气流的配合造成伊犁河谷26日20时至27日18时暴雨过程。

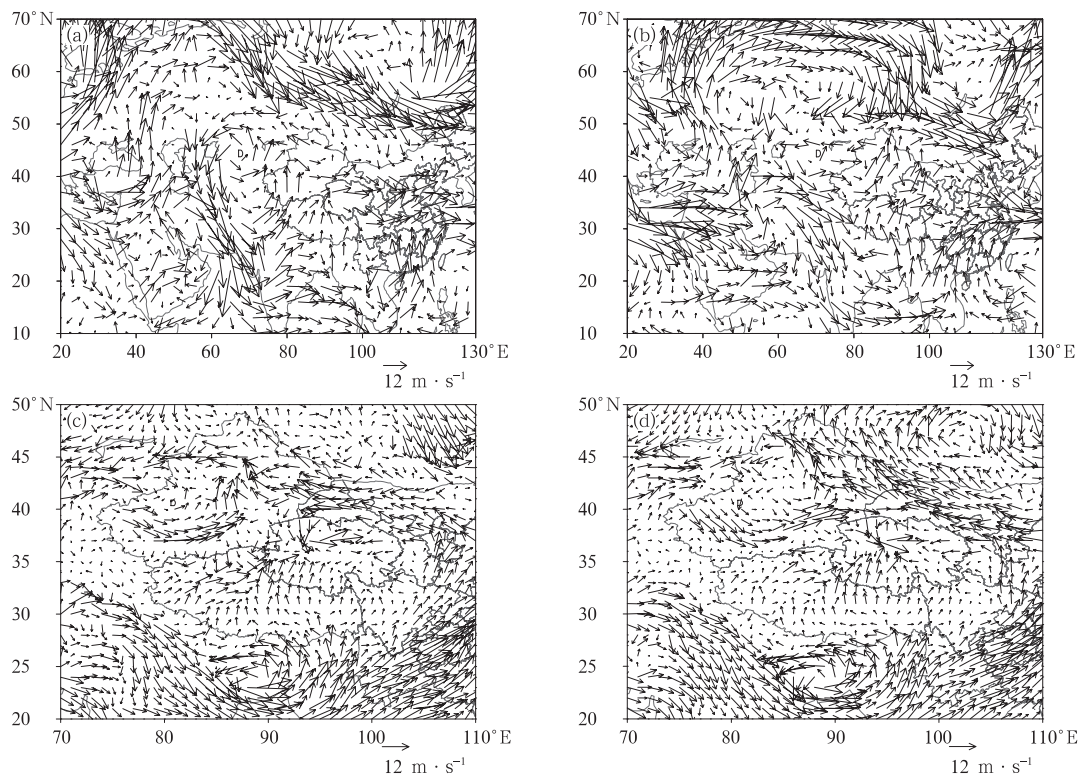


图4 2015年6月(a)24日14时, (b)27日08时500 hPa风场和(c)26日20时, (d)27日08时700 hPa风场

Fig. 4 The 500 hPa wind field at 14:00 BT 24 (a) and 08:00 BT 27 (b), 700 hPa wind field at 20:00 BT 26 (c) and 08:00 BT 27 (d) June 2015

在 27 日 08:00 的 500 hPa 位势高度场上(图 4b),长波脊进一步向东北伸展,脊顶达  $70^{\circ}\text{N}$  附近,导致中纬度地区东西方向位势高度梯度加大,在地转偏向力的作用下,中亚低涡前偏南气流明显增强,并越过天山控制中天山一带,最大风速达  $12\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。700 hPa(图 4d)风场上中亚低涡前部偏南气流贯穿天山南坡—阿勒泰东部地区,乌鲁木齐上空东南风速由  $2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  迅速增至  $14\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,同时副高东撤北抬,贝加尔湖高压反气旋式环流携带贝加尔湖水汽与副高外围偏南气流在河西走廊附近交汇,偏东气流明显增强并与低涡前部偏南气流在中天山一带地区汇合,乌鲁木齐站低层增湿明显,700 hPa 比湿迅速增至  $8\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。200 hPa 西南急流、500 hPa 西南气流、700 hPa 偏南和偏东气流,高、低空四支气流相互耦合造成中天山地区暴雨的产生。

一般认为新疆远离海洋,周围又有高山阻挡,不可能从海面上直接获得大量水汽,而“96·7”大降水研究重新分析讨论了高原水汽源的问题(徐羹慧,1997),提出了新疆境内产生降水的水汽,在合适的环流条件下,在新疆境外集中,并通过接力输送机制输送至暴雨区的概念(肖开提·多莱特等,1997)。这次降水前,低纬度暖湿气流从中亚低涡输送和补充,低涡增湿明显,降水期间,中亚低涡先影响伊犁河谷,后减弱成槽对中天山地区造成强降水,下游西太副高西伸北抬,偏东水汽接力输送通道(徐羹慧等,1997;肖开提·多莱特等,1997;杨莲梅,2003)将孟加拉湾暖湿水汽经河西走廊输送至暴雨区上空,与低涡自身携带的水汽汇合,降水前暴雨区中低层增湿明显。

### 3 中亚低涡影响期间 GPS-PWV 的演变特征

#### 3.1 GPS-PWV 空间分布特征

已有研究(史玉光,2014)利用 1976—2009 年探空探测资料计算得出新疆部分台站月平均水汽含量,伊宁站、乌鲁木齐站及天池站 6 月大气水汽气候平均值分别为 21、18 和 16 mm。

图 5 为伊犁河谷和天山山区 GPS-PWV 气候距平值图,由于 500 hPa 中亚低涡位置偏西,伊宁和新源站(图 5a)在 25 日 14:00 前 GPS 与气候平均值相差较小,气候距平值在  $-5.7\sim 6.2\text{ mm}$ ;25 日 17:00

至 26 日 16:00,受中亚低涡顶部偏东气流影响,伊宁站和新源站 GPS-PWV 气候距平值由  $6.1\text{ mm}$  增至  $16.1\text{ mm}$ ,期间河谷出现少量降水( $5\text{ mm}$ ),随后两站 GPS-PWV 出现小幅的下降;26 日 20:00 至 27 日 02:00 由于 700 hPa 偏东水汽接力输送通道建立,并与低涡自身水汽汇合,伊宁站和新源站 GPS-PWV 出现了一次快速增长,最大气候距平分别值达  $18.7$  和  $15.7\text{ mm}$ ,对应河谷雨强最强时段(27 日 02:00—08:00)。

26 日 11:00—16:00,中天山一带地区受低涡顶部偏东气流影响,降水前存在水汽聚集和累积的过程,乌鲁木齐和天池站(图 5b)GPS-PWV 气候距平值由  $0.91\sim 5.9\text{ mm}$  持续增长至  $8.9\sim 9.7\text{ mm}$ ,4 h 增幅  $4\sim 8\text{ mm}$ ;27 日 02:00—17:00 500 hPa 低涡移至河谷东部,副高东撤北抬,低层 700 hPa 偏东气流增强并与偏南气流在中天山汇合,沿天山一带测站 GPS-PWV 气候距平值由  $5.0\sim 9.2\text{ mm}$  缓慢增长至  $9.5\sim 15.5\text{ mm}$ ,2 h 后乌鲁木齐和天池站均出现降水,其中天池站 27 日 18:00—21:00 3 h 累计降水量达  $10\text{ mm}$ ;27 日 22:00 至 28 日 00:00,受低涡减弱成槽东移影响,天山山区测站 GPS-PWV 气候距平值由  $6.3\sim 15.5\text{ mm}$  持续增长至  $9.5\sim 20.3\text{ mm}$ ,GPS 出现了明显的跃增,天山山区雨强也达到最强。

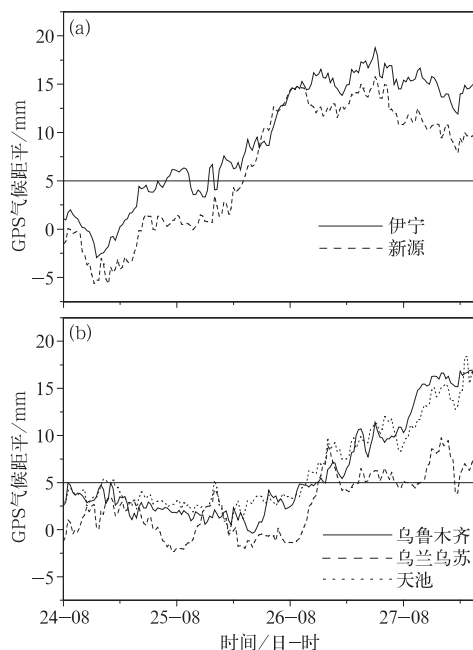


图 5 5 站 GPS-PWV 气候距平值  
Fig. 5 Climatic anomaly contours of  
GPS-PWV at five stations



综合分析 GPS-PWV 可以较好地反映大气中水汽的变化,降水前,各测站 GPS-PWV 均维持在多年平均值附近,强降水发生前,各测站 GPS-PWV 出现 1~2 次增长阶段,与 700 hPa 两支水汽汇合处的位置有较好对应关系,降水最强时段,测站 GPS-PWV 气候距平值快速增长并达到 15 mm 以上(天池山区站除外),但 GPS-PWV 气候距平值大值区并不完全对应降水大值区(如图 5b 乌兰乌苏),因而不能简单地用 GPS-PWV 气候距平值的大小直接判断降水的强弱,还应参考降水区的动力、热力等条件,这与西南涡(郝丽萍等,2013)的研究结果较一致。

### 3.2 GPS-PWV 时间演变

图 6 分别选取伊宁、乌鲁木齐、天池 3 站 2015 年 6 月 24—28 日大气水汽总量变化与地面降水的对应关系进行分析。伊宁站(图 6a)强降水时段主要集中在 27 日 04:00—14:00,最大小时降水出现在 09:00—10:00 为 13.1 mm。降水前(24 日 20:00 至 26 日 04:00),受低涡顶部东南气流影响,伊宁站 GPS-PWV 持续增湿时间达 32 h;26 日 04:00—08:00,低涡顶部东南气流明显增强,伊宁站 GPS-PWV 由 32 mm 增至 36 mm,出现了第一次剧烈增湿过程,4 h 增幅达到 4 mm,这是水汽快速累积和聚集过程,随后 GPS-PWV 维持较高值(36.1~38.1 mm);26 日 20:00,500 hPa 低涡北移至河谷南部,700 hPa 两支水汽汇合,偏东气流明显增强,对应 19:00—22:00 伊宁站 GPS-PWV 由 35 mm 迅速增至 38 mm,出现第二次急剧增加过程,2 h 后伊宁站出现 0.3 mm 降水,随后 GPS-PWV 仍持续增加,至 27 日 02:00 达到最大值(40.37 mm),同时地面伊宁站开始出现强降水,27 日 09:00—10:00 小时雨强达 13.1 mm。伊宁站强降水开始时间与 GPS 出现峰值时刻有较好的对应关系,在强降水发生前 GPS-PWV 出现两次急剧增加过程,为局地强降水提供了充沛的水汽。

乌鲁木齐(图 6b)暴雨时段主要集中在 27 日 21:00 至 28 日 04:00。降水前低涡位置偏南,乌鲁木齐 GPS-PWV 稳定维持在多年气候平均值(18 mm)附近。随着低涡向北移动,乌鲁木齐逐渐受低涡外围偏南气流控制,26 日 11:00 至 27 日 04:00 乌鲁木齐出现一次持续缓慢增湿过程,GPS-PWV 由 23 mm 增至 30 mm,4 h 后地面产生 0.2 mm 降

水。27 日 07:00—17:00,偏东水汽在河西走廊增强并与低涡前部偏南气流汇合在天山北坡,乌鲁木齐 GPS-PWV 出现一次持续增湿过程,水汽增量  $7.2 \text{ mm} \cdot (10 \text{ h})^{-1}$ ,2 h 后地面再次出现 0.1 mm 降水。27 日 20:00 受 500 hPa 槽前西南气流影响,19:00—21:00 乌鲁木齐 GPS-PWV 出现一次迅速剧烈的增加过程,GPS-PWV 由 30.7 mm 快速增至 36.4 mm,2 h 水汽增量为 5.7 mm,对应 21:00 乌鲁木齐出现强降水。27 日 22:00 至 28 日 00:00, GPS-PWV 再次出现迅速剧烈的一次增湿过程, GPS-PWV 达到峰值(38.3 mm),是多年气候平均值(18.2 mm)的两倍多,GPS-PWV 增幅 2 h 达 4.7 mm,对应 28 日 00:00 地面 1 h 降水 10.1 mm, GPS-PWV 峰值与最强降水发生时间有较好的关系。降水前 4 h, GPS-PWV 两次迅速剧烈增加,水汽在乌鲁木齐上空快速聚集,为强降水提供了充沛的水汽;降水一直持续至 28 日 04:00,在此期间 GPS-PWV 一直维持在较高值 33~38 mm,测站 7 h 累积降水量达 28 mm。28 日 07:00 的 GPS-PWV 下降至 30 mm 以下,乌鲁木齐降水结束,这与已有的研究结果(杨莲梅等,2012)较一致。

从图 6b、6c 可以看出,天池降水早于乌鲁木齐,且强降水分为两时段:27 日 18:00—21:00 和 28 日 01:00—08:00。降水发生前天池 GPS-PWV 稳定维持在多年气候平均值附近(16 mm),GPS-PWV 变幅不大(13.8~20.4 mm)。26 日 11:00—16:00 受低涡外围偏南气流影响,天池站出现了一次迅速的增湿过程,2 h 后出现 0.6 mm 降水,GPS-PWV 维持在一较高值(20.1~22.6 mm)。27 日 10:00—14:00,由于 700 hPa 两支水汽汇合于中天山地区,天池站再次出现迅速增湿过程,GPS-PWV 由 20 mm 增至 25 mm,水汽增量达  $5 \text{ mm} \cdot (4 \text{ h})^{-1}$ ,对应 14:00 天池站出现 1.4 mm 降水。16:00 天池站 GPS-PWV 达到峰值 25.9 mm,是多年气候平均值的 1.6 倍左右,2 h 后天池站开始第一阶段强降水,降水持续至 21:00,3 h 累积降水量 10 mm。可见第一阶段暴雨主要是由于 500 hPa 低涡外围偏南气流和 700 hPa 两支水汽输送汇合共同影响造成的,天池站 GPS 出现两次迅速增湿过程,空气饱和程度高,配合局地地形抬升作用,造成局地强降水。27 日 20:00 的 700 hPa 偏东水汽与低涡前偏南水汽汇合在东沿天山一带地区,天池站 GPS-PWV 出现迅速剧烈增湿过程,27 日 22:00 至 28 日 02:00 GPS-

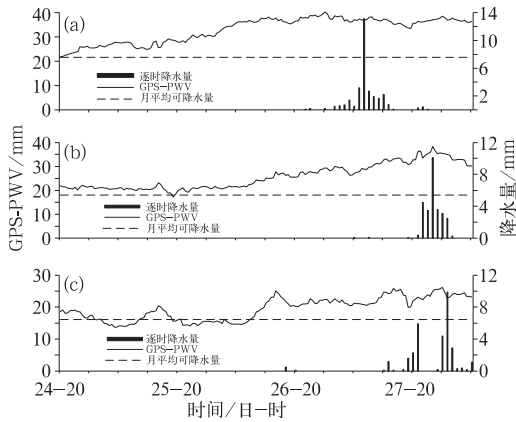


图 6 2015 年 6 月 24—28 日北疆地区 3 站 GPS-PWV 与降水量的逐时演变曲线  
(a)伊宁站,(b)乌鲁木齐站,(c)天池站  
Fig. 6 Evolutions of GPS-PWV and precipitation at (a) Yining Station, (b) Urumqi Station, (c) Tianchi Station in northern Xinjiang during 24—28 June 2015

PWV 由 22 mm 增至最大值 26 mm,4 h 水汽增值 4 mm,对应天池开始第二阶段强降水,01:00—04:00 3 h 降水量 17.2 mm,降水持续至 08:00,累积降水量 19.4 mm。与第一段暴雨相比,虽然 GPS-PWV 峰值相当,但产生的累积降水量和小时雨强相差较大,主要是由于低涡减弱成槽东移,天山北坡相应的水汽辐合和垂直运动配合较佳,因而造成第二阶段降水更加明显。

通过对伊宁、乌鲁木齐和天池 3 站暴雨过程中 GPS-PWV 演变特征的分析认为,相比于低槽系统(杨莲梅等,2012),低涡系统生命史更长,移速较慢,造成的强降水过程中水汽累积和聚集的时间与低涡的位置及滞留时间有关。降水前期,GPS-PWV 由气候平均值缓慢增长,增湿时间较长(1~3 d);GPS-PWV 增湿期间,水汽有 3~4 个变化阶段,出现 2~3 次水汽急剧增加过程。降水发生前 4 h,测站 GPS-PWV 均有 1~2 次跃变过程,不同测站水汽

增量有所不同,伊宁站和天池站 4 h 水汽增量达到 5 mm 以上,而乌鲁木齐降水前 4 h GPS-PWV 出现两次跃变,2 h 水汽增量均达到 5 mm,各站在强降水前均存在水汽的快速聚集过程。当 GPS-PWV 达到最大时,地面强降水开始,GPS-PWV 峰值几乎为气候平均的 2 倍左右。与西南涡(郝丽萍等,2013)造成的暴雨过程中 GPS-PWV 特征变化不同的是,西南涡形成前 GPS-PWV 急剧上升,完全形成时急升结束,东移后 GPS-PWV 下降至最低,而中亚低涡时间尺度和空间尺度均比西南涡大一个量级,在暴雨发生前,中亚低涡已形成且增湿明显,500 hPa 低涡移动路径、700 hPa 两支水汽汇合区的移动方向和测站 GPS-PWV 演变特征较一致。另外此次暴雨过程中,由于水汽异常充沛,各测站 GPS-PWV 变化较大,对应地面降水强度相差也较大;降水结束后,各站 GPS-PWV 仍维持一较高值,空气中水汽含量高,这说明对于干旱区暴雨的形成,动力条件相较于水汽条件更加重要,因而不能仅用大气水汽状态条件判断强降水能否出现。

由表 1 可见,在中亚低涡影响期间,伊宁站和天池站 GPS-PWV 急升持续时间均为 4 h,伊宁站增幅和极值最大,其小时雨强也最强。降水前 4 h,伊宁和天池站大气可降水量存在 1~2 次跃变过程,水汽最大增幅均超过  $5.0\text{ mm} \cdot (4\text{ h})^{-1}$ ;当 GPS-PWV 达到极值后,测站开始出现强降水,小时最大雨强分别为 13.1 和  $9.9\text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 。乌鲁木齐降水前 4 h GPS-PWV 也存在快速急升,但分为两个阶段:27 日 19:00—21:00 和 27 日 22:00 至 28 日 00:00,水汽增幅分别为  $5.7$  和  $4.7\text{ mm} \cdot (2\text{ h})^{-1}$ ,对应 GPS-PWV 极值为 36.4 和 38.3 mm。与伊宁和天池站不同的是,在暴雨发生期间,乌鲁木齐 GPS-PWV 又出现了一次急剧增长过程,最强小时降水出现在 GPS-PWV 达到峰值前后(28 日 00:00),最大雨强  $10.1\text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 。可见在暴雨发生前,测站上空均有水汽的急剧聚集,空气中的水汽迅速达到饱和,配合动力和热力条件,产生暴雨。

上述分析说明降水前 GPS-PWV 快速增加与

表 1 GPS-PWV 急升时间、增幅、极值和中亚低涡造成的降水情况

Table 1 The extremum, amplitude, and duration of GPS-PWV with the rainfall caused by Central Asia vortex					
站点	GPS-PWV 急升持续时间/h(有降水发生)	GPS-PWV 增幅/mm	GPS-PWV 极值/mm	过程降水量/mm	小时最大降水量/mm
伊宁	4	6.0	40.4	30.7	13.1
乌鲁木齐	2	5.7	36.4	28.3	10.1
	2	4.7	38.3		
天池	4	5.0	26.1	32.8	9.9

局地暴雨有密切的关系,当 GPS-PWV 达到峰值时,地面测站出现降水,但极值大小与雨强关系并不明显。所以对于短期降水预报要密切注意 GPS-PWV 的持续增长时间以及幅度,而不仅仅是它本身的量值。

### 3.3 中亚低涡和中纬度短波槽造成的乌鲁木齐强降雨过程 GPS-PWV 输送、聚集异同分析

同样受中亚低涡影响,2015 年 4 月 16 日,乌鲁木齐出现强降雨天气,16 日 17:00—22:00 的 5 h 累积降水量 29.8 mm(图 7a),与 6 月 28 日乌鲁木齐降水相似的是,受低涡前偏南气流影响,乌鲁木齐降水前 1~2 d GPS-PWV 稳定维持在一较高值(15~18 mm),是多年气候平均值(9.4 mm)的 2 倍左右,16 日 11 时开始,乌鲁木齐 GPS-PWV 出现一次缓慢持续的增加过程,至 16 日 17:00 达到峰值(20 mm),是多年气候平均值的 2.13 倍,GPS-PWV 5 h 增幅 4 mm,同时强降雨开始,最大小时降水量 7.3 mm,小时降水量超过 5 mm 时间持续了 4 h。随着强降雨的持续,GPS-PWV 逐渐减小,当 GPS-PWV 减小至气候平均值附近时,乌鲁木齐降水结束。而 2015 年 6 月 9 日 1 h 降水量 14.7 mm 是由于中纬度短波槽后西北急流触发造成(图 7b),与低涡过程不同的是,6 月 9 日乌鲁木齐短时强降雨前 GPS-PWV 在 2~3 h 内快速聚集,PWV 达到峰值时开始出现降水;当 GPS-PWV 减小至气候平均值附近时,降水结束。

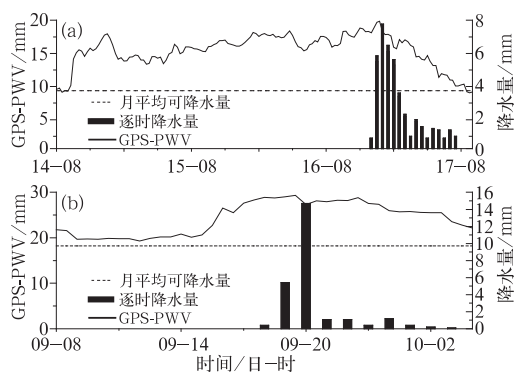


图7 2015 年 4 月 16 日(a)和 6 月 9 日(b)  
乌鲁木齐 GPS-PWV 与降水量  
逐时演变曲线

Fig. 7 Evolution of GPS-PWV and precipitation at Urumqi Station on  
(a) 16 April and (b) 9 June 2015

对比分析发现,中亚低涡造成的乌鲁木齐强降雨发生前 GPS-PWV 均存在 1~2 d 的增湿过程,期间 GPS-PWV 有 1~2 次持续快速的增加,强降雨发生前 4~5 h GPS-PWV 增幅达到 4 mm 以上;而短波槽移速快,造成的强降雨往往水汽聚集时间较短,GPS-PWV 跃变更加明显,与中亚低涡强降雨过程相似的是,当 GPS-PWV 达到峰值时,对应强降雨开始,且峰值往往达到气候平均值 2 倍左右。

## 4 GPS-PWV 与水汽输送及大尺度辐合辐散的关系

有了充足的水汽是降水发生的重要条件,但要产生降水还需要水汽的集中、辐合。因而本文选取低涡停滞时刻(24 日 14:00)、低涡北移时刻(26 日 20:00)、低涡东移时刻(27 日 08:00)从地面到 500 hPa 整层水汽通量及其散度进行分析。

降水前期 24 日 14:00(图 8a),500 hPa 低纬度大量暖湿水汽沿偏南气流经青藏高原向中亚低涡输送,低涡增湿时间达 42 h。26 日 14:00(图 8b),低涡旋转向北移动,受其外围偏南水汽影响,河谷处于水汽通量矢量大值区域,并存在  $-1 \times 10^{-7} \sim -2.5 \times 10^{-7} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$  的强水汽辐合中心,对应伊宁和新源 GPS-PWV 维持较高值(36.1~38.1 mm)。26 日 20:00 700 hPa(图 8c)偏东和偏南水汽汇合在河谷上空,河谷水汽通量矢量明显增强,水汽辐合中心由  $-0.5 \times 10^{-7} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$  迅速增至  $-3.5 \times 10^{-7} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ,伊宁站 GPS-PWV 出现第二次急剧增加,水汽的快速聚集使地面出现少量降水;27 日 02:00(图略)河谷上空水汽通量辐合进一步增强,辐合中心达  $-5 \times 10^{-7} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ,GPS-PWV 继续缓升并达到峰值(40.4 mm),对应河谷开始出现强降雨。27 日 08:00(图 8d) 700 hPa 下游副高北抬,贝加尔湖高压南压,偏东气流在河西走廊附近增强,与低涡前部偏南气流汇合在天山北坡,伊宁站 GPS-PWV 仍处于较高值(37~38 mm),地面雨强达最强,而水汽通量和水汽通量散度却均有所减弱;同时水汽通量矢量大值区东移至乌鲁木齐,且配合水汽通量辐合中心由  $-1 \times 10^{-7} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$  增至  $-3 \times 10^{-7} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ,乌鲁木齐 GPS-PWV 处于一次快速增长阶段。以上分析说明 700 hPa 中亚低涡北上并减弱成槽东移,下游副高



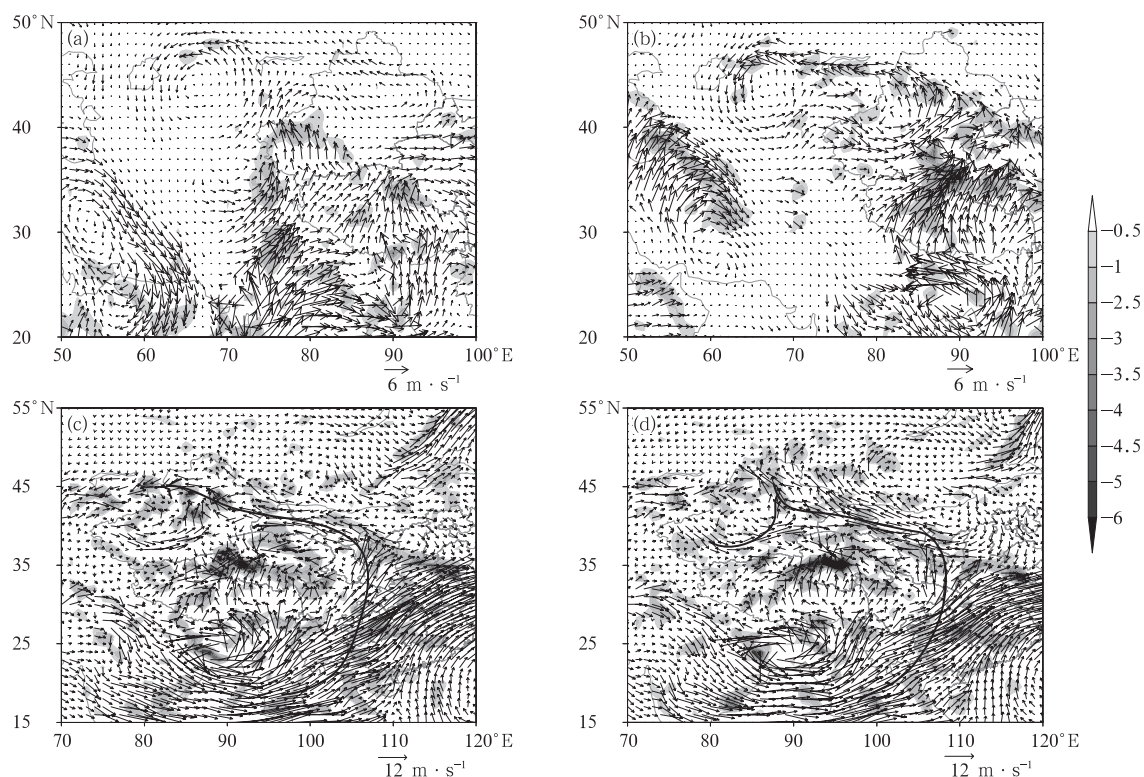


图 8 2015 年 6 月 (a)24 日 14:00, (b)26 日 14:00 500 hPa 及 (c)26 日 20:00,

(d)27 日 08:00 700 hPa 水汽通量(单位:  $\text{g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ )和

水汽通量散度(阴影, 单位:  $10^{-7} \text{g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ )

Fig. 8 Moisture flux (unit:  $\text{g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ) and moisture flux divergence (shaded area, unit:  $10^{-7} \text{g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ) at 500 hPa at 14:00 BT 24 (a) and 14:00 BT 26 (b), and at 700 hPa at 20:00 BT 26 (c) and 08:00 BT 27 (d) June 2015

先西伸后东撤北抬, 偏东和偏南水汽在暴雨区汇合, 天山北坡低层自西向东先后剧烈增湿, 水汽通量矢量大值区、水汽通量辐合区移动方向和测站 GPS-PWV 急增趋势较一致。

充足的水汽是降水发生的重要条件, 有了水汽的累积和聚集, 还必须要有水汽的集中、辐合。25 日 20:00 至 27 日 08:00 伊宁站(图 9a)均存在强水汽通量辐合和垂直上升运动, 但是结合前文 GPS-PWV 演变可以看出, 25 日 20:00 至 26 日 03:00 伊宁站处于缓慢增湿过程, GPS-PWV 增幅小, 因而地面无明显降水; 26 日 04:00—18:00, 地面 GPS-PWV 出现一次急升并维持较高值, 但此时辐合区集中在 850 hPa 以下, 中高层均为辐散场, 辐合区较浅薄, 因而地面仅出现少量降水; 27 日 02:00 伊宁站 GPS-PWV 达到最大值(40.4 mm), 随后 27 日 02:00—08:00 GPS-PWV 均处于一较高值(37~40 mm), 对应 08:00 前后伊宁站 900~850 hPa 存在

$-4 \times 10^{-7} \text{g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$  的水汽强辐合区和强烈上升运动区, 因而低层充沛的水汽在强烈的辐合抬升下被迅速携带至中高层, 造成伊宁暴雨。

天池站位于天山山脉北麓迎风坡, 海拔 1500 m 左右, 属于天山山区站。从图 9b 可以看出天池站强辐合上升运动区域主要存在 27 日 10:00 至 28 日 02:00。27 日 10:00—14:00 天池站 GPS-PWV 处于一次急剧增长过程, 水汽快速的在天池站上空聚集, 且 14:00 前后天池站 850 hPa 存在  $-6 \times 10^{-7} \text{g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$  的水汽强辐合区, 但低层上升运动不明显, 因而在 14:00 仅出现少量降水。16:00—18:00 天池站 GPS-PWV 维持在较高值(24~25 mm), 测站上空水汽充沛, 且处于水汽通量辐合区, 造成天池站 19:00—21:00 第一阶段暴雨。27 日 22:00 至 28 日 02:00, 天池站 GPS-PWV 再次急剧增加, 在此阶段有较佳的水汽通量辐合和强烈的上升运动配合, 对应天池站出现第二阶段暴雨。

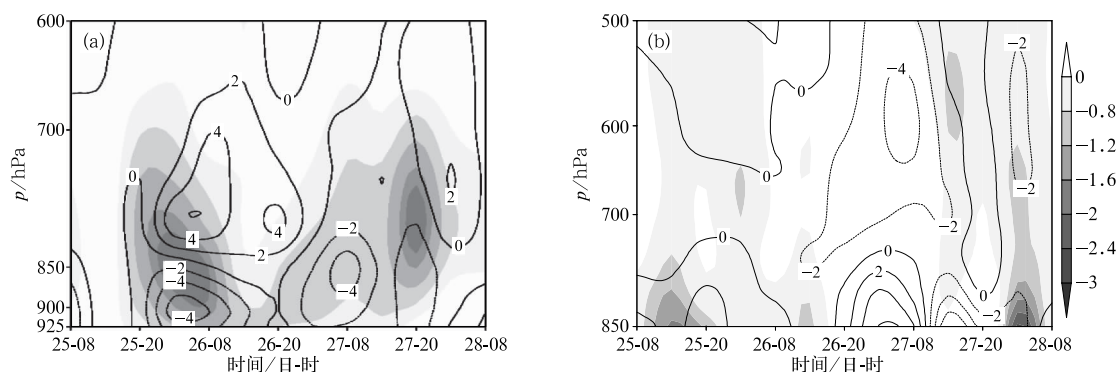


图9 2015年6月25—28日伊宁站(a)和天池站(b)水汽通量散度(等值线,

单位: $10^{-7} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ )和垂直速度(阴影区域

垂直速度 $<0$ ,单位: $\text{Pa} \cdot \text{s}^{-1}$ )剖面图

Fig. 9 Vertical distribution of moisture flux divergence (contour, unit:  $10^{-7} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ )

and vertical velocity (shaded area with vertical speed  $<0$ , unit:  $\text{Pa} \cdot \text{s}^{-1}$ ) at (a) Yining Station,

(b) Tianchi Station during 25—28 June 2015

以上分析说明,暴雨的产生,不仅需要充沛的水汽,暴雨区上空还需有深厚的水汽辐合。在同样水汽输送、辐合条件下,GPS-PWV 急剧增幅越大,对应地面雨强越强,在一定程度上,水汽输送和水汽的辐合与 GPS-PWV 的剧增存在一定的对应关系。

## 5 结论与讨论

(1) 这次降水前,500 hPa 低纬度暖湿气流向中亚低涡输送和补充,低涡增湿明显,降水期间,700 hPa 偏东水汽接力输送通道建立,并将孟加拉湾暖湿水汽经河西走廊输送至暴雨区上空,与低涡自身携带的水汽有所汇合,降水前暴雨区中低层增湿明显。

(2) 低涡系统降水过程水汽累积和聚集的时间与低涡位置及滞留时间有关。降水发生前1~3 d,测站 GPS-PWV 均出现1~2次持续增长过程,与700 hPa 两支水汽汇合有较好对应关系,在水汽聚集期间测站 GPS-PWV 有3~4个变化阶段和2~3次水汽急增过程。降水前4 h,测站 GPS-PWV 有1~2次跃变过程,各站 GPS-PWV 增幅均达到  $5 \text{ mm} \cdot (4 \text{ h})^{-1}$ ,GPS-PWV 峰值均能达到气候平均值的2倍左右。

(3) 对于干旱区暴雨的形成,动力条件相较于水汽条件更加重要,GPS-PWV 大值区及气候距平值大值区并不完全对应降水大值区。在同样水汽输送、辐合条件下,GPS-PWV 急剧增幅越大,地面雨

强越强,在一定程度上,水汽输送和水汽的辐合与 GPS-PWV 的剧增存在一定的对应关系。

(4) 中亚低涡造成的乌鲁木齐强降水发生前 GPS-PWV 均存在1~2 d 的增湿过程,期间 GPS-PWV 出现1~2次持续快速的增加,强降水发生前4~5 h GPS-PWV 增幅达到4 mm 以上, GPS-PWV 峰值往往达到气候平均值2倍左右。

## 参考文献

- 曹云昌,方宗义,夏青,2005. GPS 遥感的大气可降水量与局地降水关系的初步分析[J]. 应用气象学报,16(1):54-59.
- 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.
- 陈娇娜,李国平,黄文诗,等,2009. 华西秋雨天气过程中 GPS 遥感大气可降水量演变特征[J]. 应用气象学报,20(6):753-760.
- 楚艳丽,郭英华,张朝林,等,2007. 地基 GPS 水汽资料在北京“7·10”暴雨过程研究中的应用[J]. 气象,33(12):16-22.
- 戴新刚,李维京,马柱国,2006. 近十几年新疆水汽源地变化特性[J]. 自然科学进展,16(12):1651-1656.
- 丁金才,叶其欣,马晓星,等,2006. 区域 GPS 气象网站点合理布置的几点依据[J]. 气象,32(2):34-39.
- 丁金才,袁招洪,杨引明,等,2007. GPS/PWV 资料三维变分同化改进 MM5 降水预报连续试验的评估[J]. 气象,33(6):12-17.
- 郝丽萍,邓佳,李国平,等,2013. 一次西南涡持续暴雨的 GPS 大气水汽总量特征[J]. 应用气象学报,24(2):230-239.
- 黄玉霞,李栋梁,王宝鉴,等,2004. 西北地区近40年降水异常的时空特征分析[J]. 高原气象,23(2):245-252.
- 姜逢清,朱诚,胡汝骥,2002. 1960—1997 年新疆北部降水序列趋势探测[J]. 地理科学,21(6):669-672.
- 李成才,毛节泰,1998. GPS 地基遥感大气水汽总量分析[J]. 应用气象学报,9(4):470-477.

- 李曼,杨莲梅,赵玲,2014.天山山区一次强降雪过程 GPS 可降水量特征分析[J].干旱区研究,31(5):915-921.
- 李延兴,徐宝祥,胡新康,等,2001.应用地基 GPS 技术遥感大气柱水汽量的实验研究[J].应用气象学报,12(1):61-68.
- 施雅风,沈永平,李栋梁,等,2003.中国西北气候由暖干向暖湿转型的特征和趋势探讨[J].第四纪研究,23(2):152-164.
- 史玉光,2014.新疆降水与水汽的时空分布及变化研究[M].北京:气象出版社,79-81.
- 史玉光,孙照渤,2008.新疆水汽输送的气候特征及其变化[J].高原气象,27(2):310-319.
- 万蓉,付志康,李武阶,等,2015.地基 GPS 斜路径水汽反演技术及资料应用初探[J].气象,41(4):447-455.
- 王继竹,郭英莲,徐桂荣,等,2014.湖北省不同资料反演大气可降水量的误差分析[J].气象,40(11):1308-1315.
- 肖开提·多莱特,2005.新疆降水量级标准的划分[J].新疆气象,28(3):7-8.
- 肖开提·多莱特,汤浩,李霞,等,1997.“96·7”新疆特大暴雨的水汽条件研究[J].新疆气象,20(1):8-11.
- 徐美慧,1997.“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].新疆气象,20(1):1-4.
- 薛燕,韩萍,冯国华,2003.半个世纪以来新疆降水和气温的变化趋势[J].干旱区研究,20(2):127-130.
- 辛渝,陈洪武,张广兴,等,2008.新疆年降水量的实况变化特征[J].高原气象,27(5):993-1003.
- 杨莲梅,2003.南亚高压突变引起的一次新疆暴雨天气研究[J].气象,29(8):21-25.
- 杨莲梅,王世杰,史玉光,等,2012.乌鲁木齐夏季暴雨过程 GPS-PWV 的演变特征[J].高原气象,31(5):1348-1355.
- 杨晓霞,吴炜,万明波,等,2012.山东省两次暴雪天气的对比分析[J].气象,38(7):868-876.
- 姚建群,丁金彩,王坚捍,等,2005.用 GPS 可降水量资料对一次大暴雨过程的分析[J].气象,31(4):48-52.
- 张端禹,王明欢,陈波,2010.2008 年 8 月末湖北连续大暴雨的水汽输送特征[J].气象,36(2):48-53.
- 张家宝,邓子风,1987.新疆降水概论[M].北京:气象出版社,400.
- 张家宝,苏起元,孙沈清,等,1986.新疆短期天气预报指导手册[M].乌鲁木齐:新疆人民出版社,456-457.
- 张晶,顾松山,楚志刚,等,2014. LAPS 同化 GPS/PWV 资料在暴雨预报中的应用研究[J].气象,40(1):76-85.
- 张俊兰,2011.南疆柯坪强雷暴天气的分析[J].气象,37(7):880-888.
- 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[J].气象,41(7):816-824.
- 赵玲,安沙舟,杨莲梅,等,2010.76—2007 年乌鲁木齐可降水量及其降水转换率[J].干旱区研究,27(3):433-437.
- 赵玲,梁红,崔彩霞,2006.乌鲁木齐地基 GPS 数据的解算和应用[J].干旱区研究,23(4):654-657.
- 朱丰,徐国强,李莉,等,2014.同化青藏高原地区 GPSPWV 数据对长江中下游地区降水预报的影响评估[J].大气科学,38(1):171-189.
- Businger S, Chiswell S, 1996. The promise of GPS in atmospheric monitoring[J]. Bull Amer Meteor Soc, 77: 5-18.
- Duan J, Bevis M, Fang Peng, et al, 1996. GPS meteorology: Direct-estimation of the absolute value of precipitable water[J]. J Appl Meteor, 35(6): 830-838.