

Analysis on the Evolutionary Characteristics of GPS Precipitable Water Vapor during Summer Heavy Precipitation in Tianshan Mountain

Liu Yang, Zhancheng Zhao*, Xueying Zhou

Meteorological Bureau of Bayingolin Mongol Autonomous Prefecture, Korla Xinjiang
Email: evans0831@sina.com, *67362758@qq.com

Received: Feb. 28th, 2019; accepted: Mar. 28th, 2019; published: Apr. 15th, 2019

Abstract

The Yining, Baluntai, Tianchi and Balikun were selected as index stations to study the characteristics of GPS precipitation in summer precipitation in the Tianshan Mountains. GPS-PWV and precipitation data from 4 stations were used to analyze the evolution characteristics of GPS-PWV during the summer heavy precipitation. The results show that: 1) Before the occurrence of heavy precipitation, GPS-PWV has a significant uplifting period of 1~3 days, and the hourly increments have a rapid increase of more than 2 mm for 1~3 times. The maximum GPS-PWV values are different, among which Yining is the largest. 2) Heavy precipitation usually occurs when the GPS-PWV is higher than the average, the GPS-PWV rise phase starts, and the GPS-PWV decline maintains weak precipitation at the end of the precipitation; GPS-PWV below the average value can be used as a criterion for judging whether or not precipitation is over. Precipitation duration is consistent with GPS-PWV high value area maintenance time; the maximum hourly rainfall intensity is basically produced after the GPS-PWV maximum occurs. 3) The evolutionary characteristics of GPS-PWV during the heavy precipitation process under different types of weather processes are different.

Keywords

Precipitable Water Vapor Derived from Ground-Based GPS, Tianshan Mountains, Heavy Precipitation in Summer, Precipitation

天山山区夏季强降水过程GPS可降水量演变特征分析

杨 柳, 赵战成*, 周雪英

巴音郭楞蒙古自治州气象局, 新疆 库尔勒

作者简介: 杨柳(1982-), 女, 副高级工程师, 硕士, 主要从事气候研究及预报技术开发。
*通讯作者。

Email: evans0831@sina.com, *67362758@qq.com

收稿日期: 2019年2月28日; 录用日期: 2019年3月28日; 发布日期: 2019年4月15日

摘要

选取伊宁、巴仑台、天池和巴里坤作为研究天山山区夏季强降水过程GPS可降水量演变特征的指标站, 利用4站的GPS-PWV和降水资料, 分析了夏季强降水过程中GPS-PWV的演变特征。结果表明: 1) 强降水出现前GPS-PWV有1~3天的明显抬升过程, 且小时增量均有1~3次超过2 mm的急剧增长, GPS-PWV最大值各有不同, 其中伊宁最大; 2) 强降水通常出现在GPS-PWV高于平均值时, GPS-PWV上升阶段开始, 降水后期GPS-PWV下降仍维持较弱降水, GPS-PWV降至平均值以下可以作为判断降水是否结束的标准, 降水持续时间与GPS-PWV高值区维持时间较为一致; 最大小时雨强基本都在GPS-PWV最大值出现后产生; 3) 在不同类型天气过程影响下的强降水过程GPS-PWV演变特征有所不同。

关键词

GPS-PWV, 天山山区, 夏季强降水, 降水量

Copyright © 2019 by author(s) and Wuhan University.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

水汽是形成降水的基本条件, 在大气过程中扮演着重要的角色, 直接影响大气的垂直稳定性和天气系统的发展, 而造成强对流天气产生降水。水汽分布极不均匀、时空变化大, 是预测强降水天气的一个重要物理量。水汽含量的多少既能决定空气湿度能否达到饱和状态, 又与降水量的多少有直接的关系。地基 GPS 遥感大气可降水量(GPS-PWV)具有精度高、时空分辨率高、全天候、不受天气条件影响等诸多优点, 已逐步成为水汽探测领域中一种重要的技术方法。

目前, 国内外学者对地基 GPS 可降水量的研究已涉及很多方面[1]-[15]。张恩红等[1]对北京“7-21”暴雨期间的GPS大气可降水量时空变化序列进行分析, 结果表明: 在暴雨来临之前的24~36 h的PWV值持续在较高(>40 mm)的位置, 已有出现暴雨征兆; 在暴雨之前的几个小时PWV持续性爆发性发展(每小时PWV增加10~20 mm), 已充分具备了产生暴雨的必要条件, 有效地利用GPSMET技术对天气预报的准度和精度将有很大改善。张振东等[2]对江苏地区夏季一次强对流天气各时段GPS-PWV的变化特征和水汽输送特点进行了分析, 结果表明GPS-PWV对于空中水汽变化具有很高的敏感性, 能及时地反映大气中水汽的时空变化, 且GPS-PWV提供的精确水汽变化结合数值模式模拟出的动力、热力条件对于强对流暴雨预报和降水区域判定有较好的参考意义。Isabella Bordi等[9]对2007年1月至2012年12月美国6个台站的GPS-PWV每月平均值进行分析, 研究GPS-PWV与标准降水指数(SPI)及降水效率(PE)的关系, 发现GPS-PWV时间序列以季节周期为主, 夏季月份最大; GPS-PWV与SPI相关性很低, 而PE与SPI高度相关, 确定每月不同SPI类型的PE阈值用于预测气候的干湿转化。

天山山区是新疆降水最丰富的地区, 年降水量约占全疆降水量的40%。天山山区的大气降水是新疆地表水和地下水的主要补给源, 因此天山山区大气可降水量的研究能为强降水过程的预报预测和开发利用天山山区空

中水资源奠定基础。近年来,新疆逐步建成了天山山区地基 GPS 遥感大气可降水量观测网,新疆气象学者应用 GPS-PWV 资料针对本地强降水天气过程进行了一些研究。杨莲梅等[3]分析了乌鲁木齐地区 10 次夏季强降水天气过程 GPS-PWV 的演变特征,指出强降水过程中 GPS-PWV 呈现出 1~3 天的增湿过程并伴有跃变过程,降水时 GPS-PWV 几乎达到气候平均值的 2 倍,且跃变过程与降水的开始、结束有较好的关系。刘晶等[4]分析了一次中亚低涡造成的天山北坡暴雨天气过程的 GPS 大气水汽总量演变特征,发现强降水前 GPS-PWV 存在 1~3 天增湿过程及跃变,且增幅越大地面雨强越大,水汽输送和水汽辐合与 GPS 的剧增存在一定的对应关系。本文利用现有的天山山区地基 GPS 大气可降水量资料,分析夏季强降水过程中 GPS 可降水量的演变特征及与降水的关系,以期为天山山区强降水过程的预报预测指出明确的水汽变化指标。

2. 资料与方法

中国气象局乌鲁木齐沙漠气象研究所和美国 UCAR (University Corporation for Atmospheric Research)合作开展了 GPS 大气可降水量观测,新疆地区共有 12 个观测站,利用 GAMIT 软件处理反演得到 1 h 间隔的 GPS-PWV。赵玲等[16]利用探空观测资料计算的大气可降水量与 GPS-PWV 进行对比分析,发现两者之间的差距在 2 mm 以内,表明了 GPS-PWV 具有较高的准确性。

本文利用可获得的 GPS-PWV 资料和小时降水数据,沿天山山区自西向东依次选取伊宁、巴仑台、天池和巴里坤 4 个站(具体位置见图 1),分别作为伊犁河谷、天山南坡及北坡和天山东段的指标站,每个站点选取 2 次夏季强降水过程进行 GPS-PWV 演变特征的分析研究。

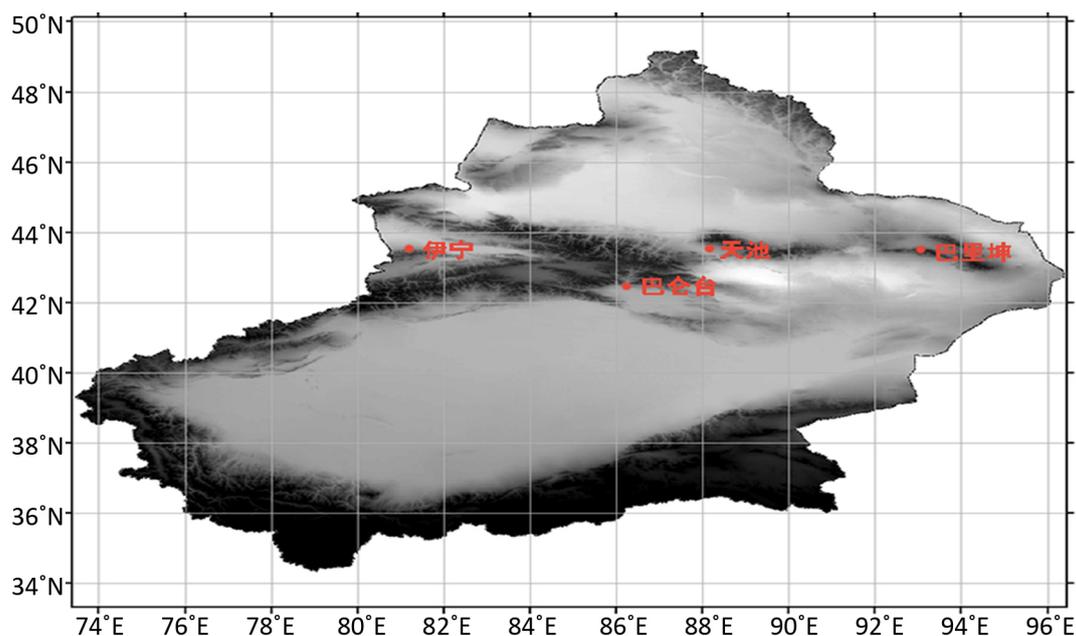


Figure 1. Locations of four GPS-PWV indicator stations in the Tianshan Mountains

图 1. 天山山区 4 个 GPS 可降水量指标观测站位置示意图

3. 夏季强降水过程 GPS 可降水量演变特征

已有研究利用历史探空探测资料及地面资料计算得到伊宁、巴仑台、天池和巴里坤的夏季日平均大气可降水量分别为 24.3、15.8、15.22 和 15.73 mm [17] [18]。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,所以新疆的气象学者已从多年预报服务实践和概率统计方法提出了适合新疆气候特点的降水标准: 24 h 降水量达到 12.1~24.0 mm 为大雨, 24.1~48.0 mm 为暴雨, >48.0 mm 为大暴雨; 小时降水量 ≥ 10.0 mm 为暴雨。

3.1. 伊宁

伊宁位于天山山区西段的伊犁河谷内,年降水量达到 382 mm,选择伊宁作为西天山指标站,通过对伊宁夏季强降水过程中 GPS-PWV 的变化分析,研究伊犁河谷夏季强降水过程的水汽演变特征。

2016 年 7 月 31 日 16 时~8 月 1 日 14 时伊宁出现了一次日降水量达到 37.9 mm 的暴雨天气过程。此次过程是欧洲脊东南衰退、西西伯利亚低涡与中亚短波槽同位向叠加,环流经向度加大、下游存在阻挡脊、南北结合的低槽缓慢东移造成的强降水过程。由图 2a 可看到,强降水出现前伊宁的 GPS-PWV 起伏明显,29 日 21 时开始 GPS-PWV 明显上升,直至 30 日 07 时达到阶段最大值 36.78 mm,最大值出现 4 h 后 11 时只出现 0.2 mm 降水,主要因为此时高低空的降水动力条件较差,整个河谷处于平直的西风气流控制。而后随着南北两支短波槽不断逆转同向叠加,GPS-PWV 持续下降,30 日 21 时降至 20.81 mm,直至 31 日 12 时 GPS-PWV 一直维持在平均值附近,表明水汽不断沿西风气流向伊犁河谷输入和堆积,30 日 12 时之后降水发生的高低空动力配置逐步有利,GPW-PWV 再次急剧上升,之后的 3 h 的小时增量均超过 2 mm,分别为 5.63、3.5 和 2.97 mm;16 时开始降水,18 时 GPS-PWV 达到了最大值 38.08 mm,

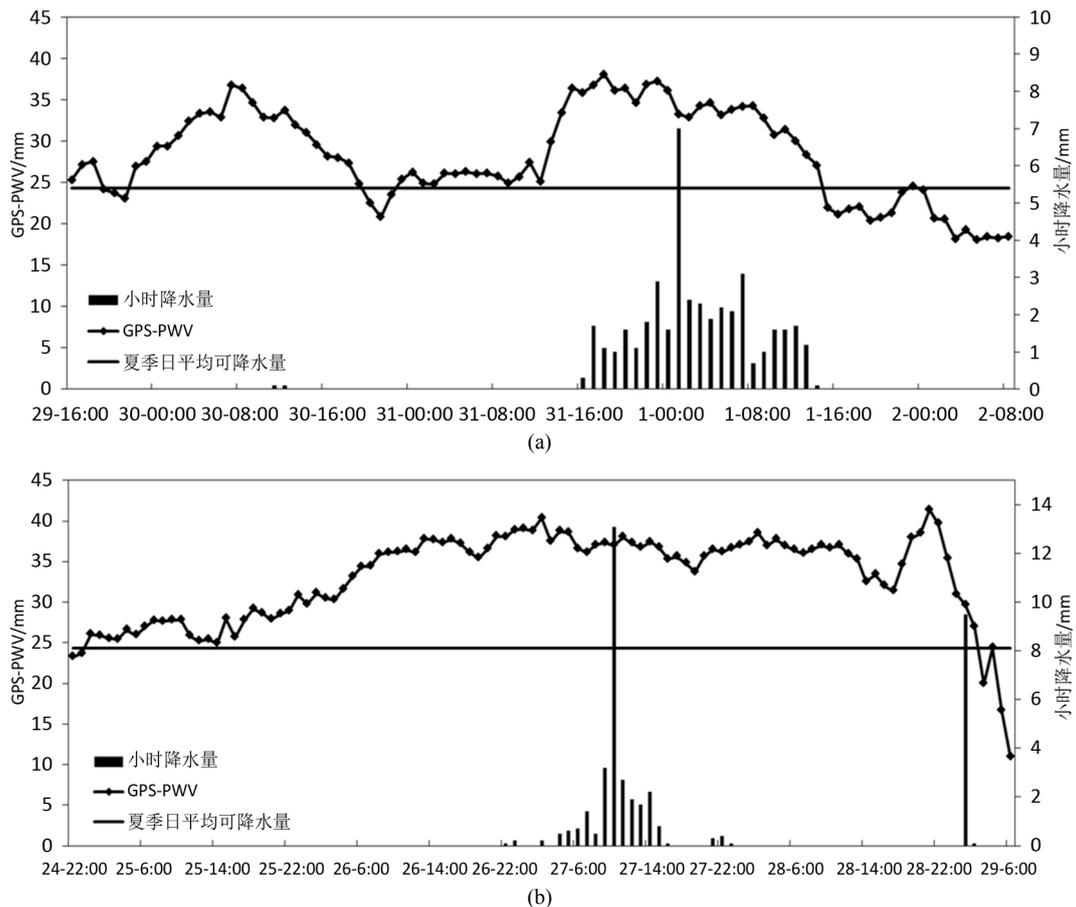


Figure 2. Time Series of GPS-PWV and Precipitation during two Heavy precipitation processes in Summer in Yining; (a) from 16:00 on 29 July to 8:00 on 2 August 2016; (b) from 22:00 on 24 to 6:00 on 29 June 2015

图 2. 伊宁 2 次夏季强降水过程 GPS-PWV 和降水量时间序列;(a) 2016 年 7 月 29 日 16:00~8 月 2 日 08:00; (b) 2015 年 6 月 24 日 22:00~29 日 6:00

最大小时雨强出现在 1 日 01 时为 7 mm;降水持续了 22 h,GPS-PWV 在降水前期及中期一直保持在 >33 mm 的高值区,后期下降,降至平均值以下降水结束。整个过程中,GPS-PWV 出现两次明显起伏,在波峰附近均出

现降水,且 GPS-PWV 最高值相当,但降水量级差别很大,说明 GPS-PWV 虽然能够精确反映站点上空的水汽变化状况,但仍需要准确诊断降水发生时段的高低空动力条件,只有水汽充沛同时高低空出现有利降水配置,才能形成强降水。

2015年6月26日22时~27日16时伊宁出现一次日降水量为30.7 mm、最大小时雨强达13.1 mm的暴雨天气过程。此次天气过程是乌拉尔山为高压脊东伸南落、中亚低涡向南发展,下游存在阻挡脊,中亚低涡东移北抬而造成强降水天气过程。由图2b可看到,降水过程开始前2天24日22时开始GPS-PWV缓慢增湿,一直处于平均值附近,直至25日16时GPS-PWV开始持续升高,水汽持续输送和累积,出现了3次明显的抬升,此阶段GPS-PWV增长较为平缓,但水汽聚集时间较长。26日22时降水出现,GPS-PWV值已经达到38.03 mm;26日22时~27日16时出现暴雨,GPS-PWV在27日2时达到阶段最高值40.37 mm,27日10时出现最大小时雨强13.1 mm,日降水量达30.7 mm;在降水时段内,GPS-PWV值一直维持35~40 mm的高值区,降水结束后GPS-PWV缓慢回落;28日17时开始GPS-PWV急剧上升,连续3小时增量超过2 mm,21时达到最大值41.37 mm,之后迅速下降,29日1时虽然出现了小时雨强为9.5 mm的强降水,但降水持续时间很短,GPS-PWV降至平均值以下降水结束。

通过对伊宁站2次暴雨过程GPS-PWV的演变特征分析得出,在强降水出现前1~2天水汽明显增长,GPS-PWV出现2~3次小时增量超过2 mm或5 h增量超过5 mm的急剧上升,GPS-PWV最大值为38~40 mm,均出现在降水开始附近3 h内;降水出现在GPS-PWV高于平均值时,降水后期GPS-PWV下降仍维持较弱降水,最大小时雨强出现在GPS-PWV最大值之后。图2a过程GPS-PWV高值区维持时间与降水持续时间有明显的正相关,降水在GPS-PWV上升阶段开始,GPS-PWV降至平均值以下结束;图b过程中可以明显看出,虽然过程后期出现了GPS-PWV最大值,但并没有持续的水汽输送,GPS-PWV迅速下降,所以降水持续时间很短,降至平均值以下降水结束。

3.2. 巴仑台

巴仑台位于中天山南侧巴州境内,是巴州夏季强降水发生次数最多的站点,年降水量为220 mm,同时巴仑台也是乌鲁木齐夏季降水预报常用指标站,因此选择巴仑台站作为中天山南坡指标站。通过对巴仑台强降水过程GPS-PWV的变化分析,研究中天山南坡夏季强降水过程的水汽演变特征。

2013年7月22~23日巴仑台出现一次日降水量达20.2 mm的强降水过程。此次过程欧亚范围为纬向环流,东欧脊向北伸展,西伯利亚低涡底部锋区逆转分裂短波东移造成北疆为主、沿天山的强对流和局地暴雨天气过程。由图3a可看出,降水开始前2天20日19时GPS-PWV开始迅速攀升,直至22日18时达到最大值26.32 mm,降水随之开始,出现了日降水量为20.2 mm的大雨;在增湿过程中,虽然只出现1次小时增量超过2 mm,但总体一直处于上升状态,增湿过程时间较长;最大小时雨强出现在23日1时,达到5.4 mm;降水开始后GPS-PWV开始下降,23日22时降至平均值以下降水结束。

2012年8月1~3日巴仑台出现一次日降水量达13.8 mm的大雨过程,影响此次天气过程的系统与图3a类似。由图3b可看出,1日3时GPS-PWV值为12.66 mm,之后GPS-PWV剧烈上升并迅速超过平均值,直至18时达到最高值27.18 mm,其中有2次GPS-PWV的小时增量超过2 mm,分别为4.44、3.2 mm,说明水汽增长非常剧烈,但21时只出现了0.2 mm的微量降水,之后GPS-PWV迅速下降并低于气候平均值;2日11时开始GPS-PWV再次迅速上升,出现2次小时增量超过2 mm,分别为2.8、2.79 mm,20时GPS-PWV达到25.85 mm,降水随之开始,2日20时~3日08时出现了13.8 mm的大雨,最大小时雨强出现在20时为4.1 mm,GPS-PWV最大值出现在21时为26.27 mm;在降水前期GPS-PWV一直维持较高,后期下降。在整个过程中GPS-PWV有两次明显起伏,在波峰附近都对降水天气发生。第一个波峰巴仑台只出现微量降水,但周边区域站却出现了大雨,第二个波峰巴仑台出现大雨,表明短波系统影响的降水落区范围小、局地性强的对流性降水,GPS-PWV处于波峰时仍具有很好的指示意义。

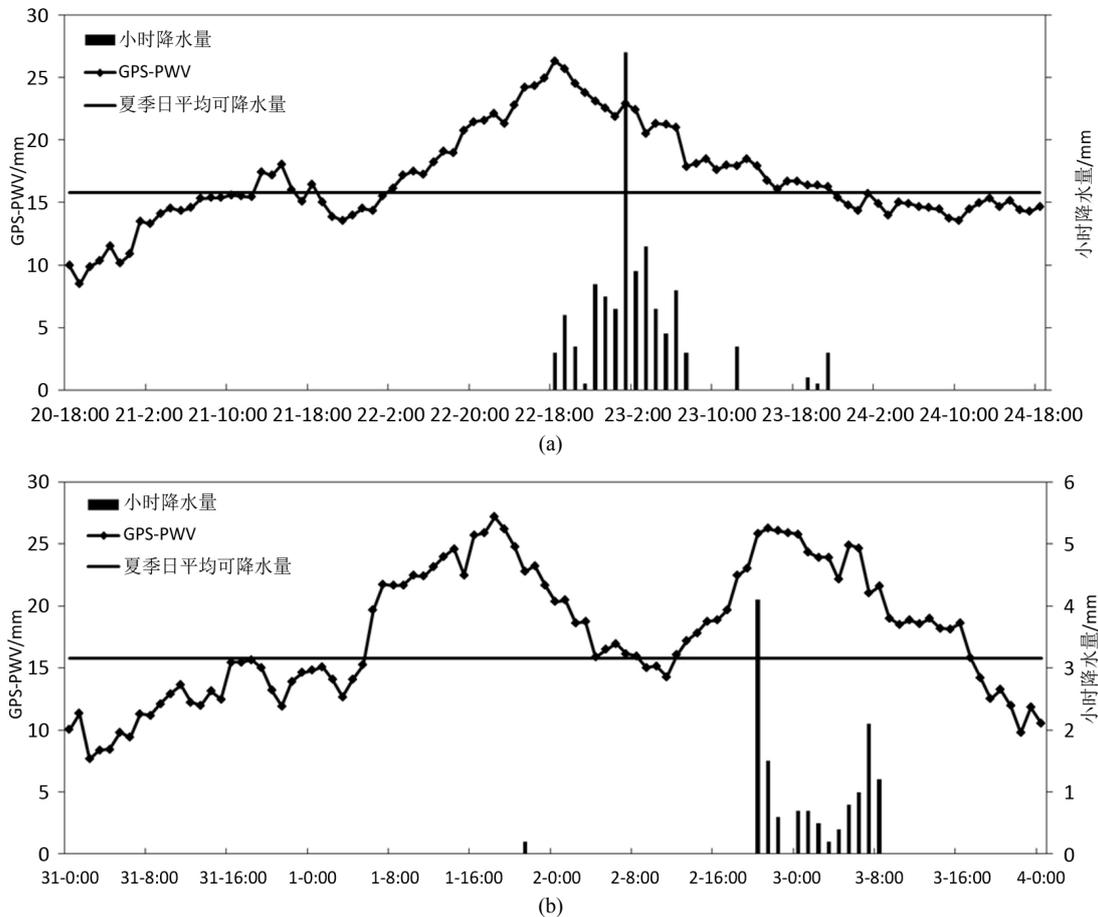


Figure 3. Time Series of GPS-PWV and Precipitation during two Heavy precipitation processes in Summer in Baluntai; (a) from 18:00 on 20 to 18:00 on 24 July 2013; (b) from 0:00 on 31 July to 0:00 on 4 August 2012
图 3. 巴仑台 2 次夏季强降水过程 GPS-PWV 和降水量时间序列; (a) 2013 年 7 月 20 日 18:00~24 日 18:00; (b) 2012 年 7 月 31 日 0:00~8 月 4 日 0:00

通过对巴仑台 2 次强降水天气过程 GPS-PWV 的演变特征分析得出, 强降水开始前 2 天左右 GPS-PWV 有明显起伏, 水汽聚集迅速, 有 1~2 次小时增量超过 2 mm, GPS-PWV 最大值为 27 mm, 出现在降水开始后 1 h 内; 降水出现在 GPS-PWV 高于平均值时, 开始于 GPS-PWV 上升阶段, 降水后期 GPS-PWV 下降仍维持较弱降水, 降水持续时间与 GPS-PWV 高值区维持时间成正相关。

2 次过程降水结束时间和小时雨强出现时间有所不同, 图 3a 过程 GPS-PWV 降至平均值以下降水立即结束, 最大小时雨强在 GPS-PWV 最大值出现之后, 图 3b 过程降水结束后 8h GPS-PWV 才降至平均值以下, 最大小时雨强先于 GPS-PWV 最大值出现。

3.3. 天池

天池位于中天山北坡昌吉州境内, 是中天山暴雨频发区域, 年降雨量高达 571.8 mm。选择天池作为中天山北坡指标站, 通过对天池暴雨过程 GPS-PWV 的变化分析, 研究中天山北坡夏季强降水过程的水汽演变特征。

2016 年 8 月 7~8 日天池出现一次 37.5 mm 的暴雨天气过程。此次强降水过程是欧洲脊发展、西西伯利亚低涡逆分裂的短波与西太平洋副热带高压外围西南气流结合后东移北收, 而造成的一次全疆大范围明显的强降水天气过程。由图 4a 可看出, 降水出现前有长达 3 天的增湿过程, 自 4 日 0 时开始 GPS-PWV 虽然稍有波动但整体处于持续抬升状态, 6 日 22 时达到最大值 29.3 mm, 抬升过程中有多次 GPS-PWV 的小时增量超过 2 mm;

7日4时开始出现了小量降水,之后缓慢上升,21时 GPS-PWV 达到 30.13 mm 降水开始,小时增量达 2.5 mm,22时 GPS-PWV 达到最高值 30.65 mm,之后降水一直持续至8日22时结束,日降水量达 37.5 mm,最大小时雨强出现在8日9时为 4.7 mm。在降水过程前期 GPS-PWV 维持较高,后期下降。

2015年6月8~9日天池出现最大日降水量达 40.2 mm 的强降水过程。此次过程中欧洲脊向东发展,环流经向度不断加大,乌拉尔山低槽与中纬度副热带锋区上短波槽在新疆结合共同作用,造成南北疆大范围的对流和系统性强降水天气过程。由图 4b 可看出,6月7日8时 GPS-PWV 为 7.82 mm,之后剧烈上升,连续出现3次 GPS-PWV 小时增量超过 2 mm,最大达到 3.3 mm,8日0时达到 19.13 mm 降水开始;GPS-PWV 阶段最大值 19.55 mm 出现在1时,并伴随着最大小时雨强 6.5 mm,21时此阶段降水结束,日降水量达 15.6 mm;降水结束后 GPS-PWV 有所下降,9日9:00 为最低点 13.05 mm,15时开始 GPS-PWV 再次急剧上升,最大小时增量达到 3.58 mm,9日18:00 降水开始;GPS-PWV 最大值出现在19时为 21.88 mm,随后2h内出现了最大和次最大小时雨强,分别为 16.2、10.4 mm,这样的小时雨强在新疆地区实属罕见。10日8时降水结束,日降水量达到 40.2 mm;降水前期 GPS-PWV 维持较高,后期下降,降至平均值以下降水结束。

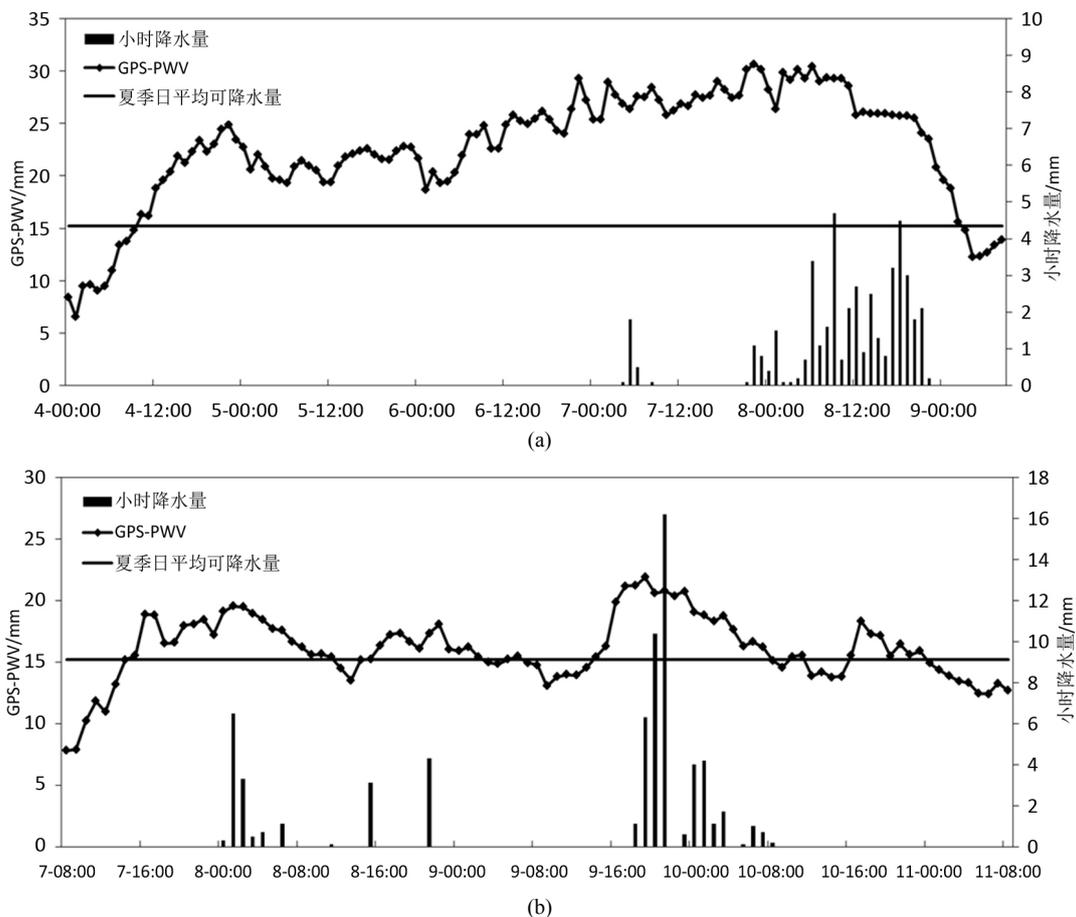


Figure 4. Time Series of GPS-PWV and Precipitation during three Heavy precipitation processes in Summer in Tianchi; (a) from 0:00 on 4 to 8:00 on 9 August 2016; (b) from 8:00 on 7 to 8:00 on 11 June 2015
图 4. 天池 2 次夏季强降水过程 GPS-PWV 和降水量时间序列; (a) 2016 年 8 月 4 日 0:00~9 日 8:00; (b) 2015 年 6 月 7 日 8:00~11 日 8:00

通过对天池 2 次强降水天气过程 GPS-PWV 的演变特征分析得出,降水开始前有 1~3 天的水汽聚集过程,1~3 次 GPS-PWV 小时增量超过 2 mm, GPS-PWV 最大值为 20~30 mm,均出现在降水开始前后 3 h 内;降水均

出现在 GPS-PWV 高于平均值时, 开始于 GPS-PWV 上升阶段, 降水后期 GPS-PWV 下降仍维持较弱降水; 图 5a 过程降水结束后 3 h GP-SPWV 才降至平均值以下, 图 5b 过程 GPS-PWV 降至平均值以下降水立即结束。降水持续时间与 GPS-PWV 高值区维持时间较为一致, 最大小时雨强在 GPS-PWV 最大值之后出现。

3.4. 巴里坤

巴里坤位于天山山脉东段, 是哈密地区暴雨多发区域, 年降雨量为 228 mm。选择巴里坤作为东天山指标站, 通过对巴里坤强降水过程 GPS-PWV 的变化分析, 研究东天山夏季强降水过程的水汽演变特征。

2015 年 6 月 18 日巴里坤出现一次 12.6 mm 的大雨过程。此次降水过程是由乌拉尔山低槽东移南下进入新疆发展为低涡, 下游存在阻断脊、低涡停滞逆转, 而造成南疆中东部的系统性和对流性降水。由图 5a 可看出, 6 月 15 日 16 时开始 GPS-PWV 缓慢上升, 直至 16 日 16 时达到 23.52 mm, 出现了小量降水, 上升过程中出现 2 次小时增量超过 2 mm, 分别为 3.43、2.12 mm; 17 日断续出现小量降水, GPS-PWV 一直维持在 >18 mm 的范围; 18 日 3 时~17 时, 出现连续降水, 日降水量为 12.6 mm, 达到大雨量级, GPS-PWV 降至平均值以下降水结束。此次过程 GPS-PWV 上升较为缓慢, 降水持续时间较长, 小时雨强不大。

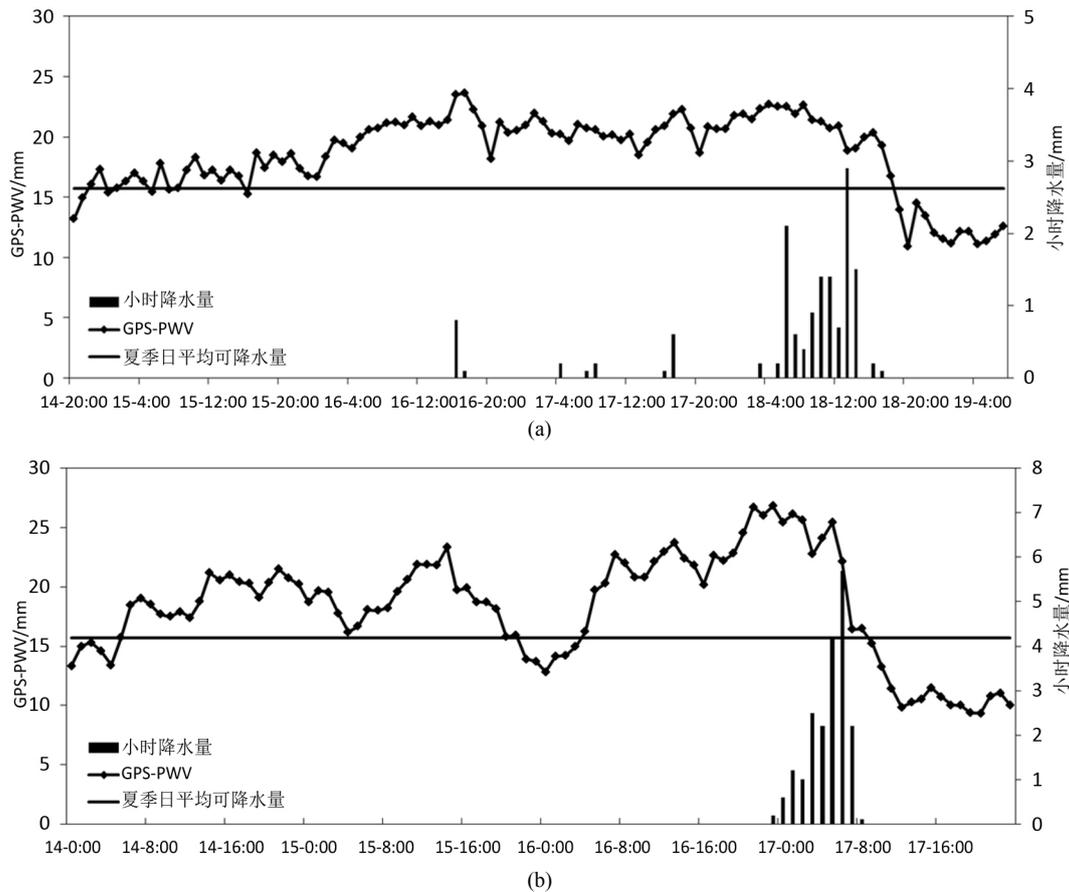


Figure 5. Time Series of GPS-PWV and Precipitation during three Heavy precipitation processes in Summer in Balikun; (a) from 20:00 on 14 to 7:00 on 19 June 2015; (b) from 0:00 on 14 to 23:00 on 17 July 2014

图 5. 巴里坤 2 次夏季强降水过程 GPS-PWV 和降水量时间序列; (a) 2015 年 6 月 14 日 20:00~19 日 7:00; (b) 2014 年 7 月 14 日 0:00~17 日 23:00

2014 年 7 月 17 日巴里坤出现一次降水量达到 19.9 mm 的大雨过程。此次降水是在西伯利亚低涡系统东移减弱后, 与中纬度短波在东疆结合形成的短波槽造成的局地强降水过程。由图 5b 可看出, 14 日 0 时~16 日 0 时

GPS-PWV 一直处于明显起伏的阶段, 但并没有产生降水; 16 日 0 时 GPS-PWV 为 12.84 mm, 之后剧烈持续抬升, 出现 3 次 GPS-PWV 小时增量超过 2 mm, 其中一次小时增量高达 3.52 mm, 说明水汽迅速聚集; 16 日 23 时达到最高值 26.82 mm, 降水开始。降水持续阶段 GPS-PWV 维持较高水平, 直至 17 日 6 时出现最大小时雨强 5.7 mm, 随后下降, 降至平均值以下降水结束。

通过对巴里坤 2 次强降水天气过程 GPS-PWV 的演变特征分析得出, GPS-PWV 在强降水出现前 1~2 天出现明显抬升, 有 2~3 次小时增量超过 2 mm 的急剧上升, GPS-PWV 最大值为 22~26 mm, 出现在降水开始附近 2 h 内; 降水基本都出现在 GPS-PWV 高于平均值时, GPS-PWV 上升阶段开始, 降水后期 GPS-PWV 下降仍维持较弱降水, GPS-PWV 降至平均值以下则降水结束, 降水时段与 GPS-PWV 高值区时段基本保持一致; 最大小时雨强出现在 GPS-PWV 最大值之后。

4. 结论

通过对天山山区的伊宁、巴仑台、天池和巴里坤 4 个指标站的夏季强降水天气过程中 GPS-PWV 的演变特征的分析, 得到了以下结论:

1) 夏季出现强降水过程前, 4 站 GPS-PWV 都会发生明显的抬升, 持续时间约为 1~3 天。强降水时 GPS-PWV 变化剧烈, 说明水汽出现一个由干到湿的显著增长过程。由于干旱区水汽缺乏, 这种水汽显著增加过程为降水的产生提供了一个清晰的前期信号。

2) 强降水过程发生前, GPS-PWV 小时增量均有 1~3 次超过 2 mm 的急剧增长。过程中 GPS-PWV 最大值各有不同: 伊宁为 38~40 mm, 巴仑台为 27 mm, 天池站为 20~30 mm, 巴里坤为 22~26 mm, 伊宁明显高于其它 3 站; 最大小时雨强基本都在 GPS-PWV 最大值出现后产生。

3) 强降水通常出现在 GPS-PWV 高于平均值时, GPS-PWV 上升阶段开始, 降水后期 GPS-PWV 下降仍维持较弱降水, 降水持续时间与 GPS-PWV 高值区维持时间较为一致; GPS-PWV 降至平均值以下可以作为判断降水是否结束的标准, 4 站共 8 次天气过程中 6 次 GPS-PWV 降至平均值以下降水立即停止, 特别是伊宁和巴里坤, 其它 2 次过程有所不同, 但在 GPS-PWV 低于平均值时均无降水产生。

4) 在不同类型天气过程影响下的强降水过程 GPS-PWV 演变特征有所不同: 伊宁图 a、图 b、天池图 a 及巴里坤图 a 过程环流背景均为经向度加大的大型槽脊活动, 下游都存在阻止脊, 前期增湿过程长达 2~3 天, 增速较为缓慢, GPS-PWV 一直高于平均值; 巴仑台 2 次过程均为中纬度短波系统影响, 天气局地性较强, 增湿过程中 GPS-PWV 有明显起伏, 上升剧烈; 天池图 b 和巴里坤图 b 过程为东移减弱的南北两支系统相结合造成, 也具有较强的局地性, 降水发生前 GPS-PWV 有明显的起伏、增湿过程迅速, 多次出现谷峰和谷底的交替。

本文仅利用现有的 GPS-PWV 和降水资料, 选取位于天山山区的 4 个站点夏季强降水天气过程, 对强降水过程中的 GPS-PWV 演变特征做了初步的分析。由于 GPS-PWV 数据不完整, 存在选取站点和强降水天气过程都较少的问题。水汽只是产生降水的必要条件之一, 在降水短时临近预报实际业务中, 必须配合动力、热力和不稳定条件对 GPS-PWV 的变化进行综合分析, 这样才能有利于对降水的预报做出准确的判断。希望今后能够通过 GPS-PWV 资料的积累和收集, 对天山山区强降水天气过程水汽的演变特征进行更加全面、深入的研究。

基金项目

新疆气象局面上项目(MS201605), 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目(IDM2016001), 中国沙漠气象科学研究基金(Sqj2016017)共同资助。

参考文献

[1] 张恩红, 曹云昌, 王晓英, 等. 利用地基 GPS 数据分析北京“7 21”暴雨水汽特征[J]. 气象科技, 2015, 43(6): 1157-1163.

- ZHANG Enhong, CAO Yunchang, WANG Xiaoying, et al. Characteristics of water vapor in a heavy rainstorm based on ground-based GPS measurements in Beijing. *Meteorological Science and Technology*, 2015, 43(6): 1157-1163. (in Chinese)
- [2] 张振东, 魏鸣, 王皓. 用 GPS 水汽监测资料分析一次强对流性降水过程[J]. *气象科学*, 2013, 33(5): 492-499.
ZHANG Zhendong, WEI Ming, WANG Hao. A severe convective precipitation based on ground-based GPS water vapor monitoring system. *Journal of the Meteorological Sciences*, 2013, 33(5): 492-499. (in Chinese)
- [3] 杨莲梅, 王世杰, 史玉光, 等. 乌鲁木齐夏季强降水过程 GPS-PWV 的演变特征[J]. *高原气象*, 2012, 31(5): 1348-1355.
YANG Lianmei, WANG Shijie, SHI Yuguang, et al. Evolution feature of precipitable water vapor derived from ground-based GPS during summer heavy precipitation in Urumqi. *Plateau Meteorology*, 2012, 31(5): 1348-1355. (in Chinese)
- [4] 刘晶, 杨莲梅. 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*, 2017, 43(6): 724-734.
LIU Jing, YANG Lianmei. Development features of GPS atmospheric precipitable water vapor in heavy rainfall caused by central asia vortex on the north slope of Tianshan Mountain. *Meteorological Monthly*, 2017, 43(6): 724-734. (in Chinese)
- [5] 闵凡花, 夏佰成, 刘德, 等. 大气可降水量在重庆夏季暴雨天气过程中的特征分析[J]. *干旱气象*, 2013, 31(1): 126-130.
MIN Fanhua, XIA Baicheng, LIU De, et al. Features of precipitable water vapor data/GPS during the summer rainstorm processed in Chongqing. *Journal of Arid Meteorology*, 2013, 31(1): 126-130. (in Chinese)
- [6] 宋雯雯, 李国平, 王皓. 四川盆地一次强降水过程水汽特征[J]. *气象科技*, 2018, 46(1): 129-138.
SONG Wenwen, LI Guoping and WANG Hao. Cooperative analysis of a heavy precipitation process in Sichuan basin by using WRF model and ground-based GPS water vapor data. *Meteorological Science and Technology*, 2018, 46(1): 129-138. (in Chinese)
- [7] 李曼, 杨莲梅, 赵玲. 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*, 2014, 31(5): 915-921.
LI Man, YANG Lianmei and ZHAO Ling. Snowfall derived from ground-based GPS in a heavy snowfall process in the Tianshan Mountains. *Arid Zone Research*, 2014, 31(5): 915-921. (in Chinese)
- [8] 张树民, 王坤, 孙刚, 缪燕, 等. 台风尼伯特(1601)残留低压局地大暴雨成因分析[J]. *气象科技*, 2018, 46(1): 139-148.
ZHANG Shumin, WANG Kun, SUN Gang, et al. Effect of residual low of typhoon nepartak on a local extraordinary rainstorm. *Meteorological Science and Technology*, 2018, 46(1): 139-148. (in Chinese)
- [9] BORDI, I., ZHU, X. and FRAEDRICH, K. Precipitable water vapor and its relationship with the standardized precipitation index: Ground-Based GPS measurements and reanalysis data. *Theoretical and Applied Climatology*, 2016, 123: 263-275.
- [10] UANGAREE, P., KINGPAIBOON, S. and KHUANMAR, K. Determination of the dates of the southwest monsoon in northeastern Thailand from the data on precipitable water vapor obtained by GPS. *Russian Meteorology and Hydrology*, 2015, 40: 647-657.
- [11] 杨晓春, 王建鹏, 白庆梅, 等. 西安不同季节降水过程中大气可降水量变化特征[J]. *干旱气象*, 2013, 31(2): 278-282.
YANG Xiaochun, WANG Jianpeng, BAI Qingmei, et al. Characteristic analysis of GPS/Pwv during seasonal precipitation processes in Xi'an of Shaanxi Province. *Journal of Arid Meteorology*, 2013, 31(2): 278-282. (in Chinese)
- [12] 郭英莲, 王继竹, 王海燕, 等. GPS 可降水量在湖北暴雨预报中的指示性[J]. *气象科技*, 2015, 43(4): 666-674.
GUO Yinglian, WANG Jizhu, WANG Haiyan, et al. Indication of GPS precipitable water vapor for rainstorm forecast in Hubei. *Meteorological Science and Technology*, 2015, 43(4): 666-674. (in Chinese)
- [13] 姚俊强, 杨青, 黄俊利, 等. 天山山区及周边地区水汽含量的计算与特征分析[J]. *干旱区研究*, 2012, 29(4): 567-573.
YAO Junqiang, YANG Qing, HUANG Junli, et al. Computation and analysis of water vapor content in the Tianshan Mountains and peripheral regions, China. *Arid Zone Research*, 2012, 29(4): 567-573. (in Chinese)
- [14] SHARIFI, M. A., KHANIANI, A. S. and JOGHATAEI, M. Comparison of GPS precipitable water vapor and meteorological parameters during rainfalls in Tehran. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 2015, 127: 701-710.
- [15] ZHAO, Q., YAO, Y. and YAO, W. GPS-Based PWV for precipitation forecasting and its application to a typhoon event. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2017, 167: 124-133.
- [16] 赵玲, 梁宏, 崔彩霞. 乌鲁木齐地基 GPS 数据的解算和应用[J]. *干旱区研究*, 2006, 23(4): 654-657.
ZHAO Ling, LIANG Hong and CUI Caixia. Solution and application of the ground-based GPS data in Urumqi, Xinjiang. *Arid Zone Research*, 2006, 23(4): 654-657. (in Chinese)
- [17] 李霞, 张广兴. 天山可降水量和降水转化率的研究[J]. *中国沙漠*, 2003, 23(5): 209-513.
LI Xia, ZHANG Guangxin. Research on precipitable water and precipitation conversion efficiency around Tianshan Mountain Area. *Journal of Desert Research*, 2003, 23(5): 509-513. (in Chinese)
- [18] 史玉光, 杨青, 杨莲梅, 等. 新疆降水与水汽的时空分布及变化研究[M]. 2014: 79-82.
SHI Yuguang, YANG Qing, YANG Lianmei, et al. Temporal and spatial distribution and change of precipitation and water vapor in Xinjiang. 2014: 79-82. (in Chinese)