

于晓晶,唐永兰,于志翔,等,2019. 基于地基 GPS 资料的天山山区夏季大气可降水量特征[J]. 气象,45(12):1691-1699. Yu X J, Tang Y L, Yu Z X, et al, 2019. Characteristics of precipitable water vapor over the Tianshan Mountains based on GPS observations[J]. Meteor Mon, 45(12): 1691-1699 (in Chinese).

## 基于地基 GPS 资料的天山山区夏季 大气可降水量特征\*

于晓晶<sup>1,2,3</sup> 唐永兰<sup>4</sup> 于志翔<sup>5</sup> 赵 玲<sup>1</sup> 姚俊强<sup>1</sup>

1 中国气象局乌鲁木齐沙漠气象研究所, 乌鲁木齐 830002

2 中国科学院大气物理研究所大气科学与地球流体力学数值模拟国家重点实验室, 北京 100029

3 中国科学院大学, 北京 100049

4 中国气象局武汉暴雨研究所暴雨监测预警湖北省重点实验室, 武汉 430205

5 乌鲁木齐气象卫星地面站, 乌鲁木齐 830011

**提 要:** 基于新疆天山山区 2012—2015 年夏季的 GPS/PWV 资料、探空资料和逐日降水资料, 运用多种统计方法, 分析天山山区夏季大气可降水量(PWV)的时空变化特征, 并初步探讨其原因。从夏季平均值分布来看, 天山山区各站 PWV 分布存在明显差异, 与海拔高度呈显著负相关关系; 且低海拔站点 PWV 比高海拔站点表现出更大的发散性和可变性, 有雨日 PWV 的极值、中位数等整体高于无雨日。天山山区夏季 PWV 表现出显著的月变化和日变化。大部分站点 7 月 PWV 最大, 6 月次之, 8 月最少; 一日之中在 10 时左右出现日最大值, 个别站点表现出不同的变化特征, 且有雨日和无雨日也存在一定差异。天山山区各站夏季降水量与其 PWV 关联性不明显, 降水量和水分循环指数均与海拔高度呈显著正相关关系。这可能是因为夏季山区高海拔站点更易产生局地对流性降水, 从而增加水分循环次数所致。

**关键词:** 地基 GPS, 大气可降水量, 日变化, 夏季降水

**中图分类号:** P416, P426

**文献标志码:** A

**DOI:** 10. 7519/j. issn. 1000-0526. 2019. 12. 006

## Characteristics of Precipitable Water Vapor over the Tianshan Mountains Based on GPS Observations

YU Xiaojing<sup>1,2,3</sup> TANG Yonglan<sup>4</sup> YU Zhixiang<sup>5</sup> ZHAO Ling<sup>1</sup> YAO Junqiang<sup>1</sup>

1 Institute of Desert Meteorology, CMA, Urumqi 830002

2 State Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Science and Geophysical Fluid Dynamics,  
Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

3 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

4 Hubei Key Laboratory for Heavy Rain Monitoring and Warning Research, Institute of Heavy Rain, CMA, Wuhan 430205

5 Urumqi Meteorological Satellite Ground Station, National Satellite Meteorological Centre, Urumqi 830011

**Abstract:** Based on the precipitable water vapor (PWV) data observed by Global Positioning System (GPS), the radiosonde data and daily precipitation data and employing several statistical methods, characteristics of summer PWV over the Tianshan Mountains and their possible reasons were analyzed. For the distribution of summer PWV average, remarkable differences exist among stations over the Tianshan

\* 国家自然科学基金项目(41505025)、新疆维吾尔自治区自然科学基金项目(2018D01B06)和中国沙漠气象科学研究基金(Sqj2011002)共同资助

2018 年 8 月 21 日收稿; 2019 年 11 月 4 日收修定稿

第一作者: 于晓晶, 主要从事气候变化和数值模拟研究. Email: yxj1301@126.com

通信作者: 唐永兰, 主要从事天气气候预测和数值模拟研究. Email: tayola@163.com

Mountains, and there is a significant negative relationship between PWV and station altitude. The PWV at lower altitudes exhibits more variabilities and divergences than that at higher altitudes. The extreme and median of PWV in rainy days exceed those in rainless days. The daily and monthly variations of summer PWV are considerable, and most stations present maximum in July and minimum in August. As to diurnal variation, most stations have maximum at about 10 o'clock while some individual stations exhibit opposite features, and discrepancies still exist between rainy days and rainless days. There is no direct correlation between precipitation and PWV. However, precipitation and water cycle index are positively related to station altitude, which maybe be attributed to more local convective precipitation processes over higher mountains in summer and more water cycle frequencies.

**Key words:** ground-based GPS, precipitable water vapor (PWV), diurnal variation, summer rainfall

## 引 言

水汽在大气中所占比例很小,仅为 0.1%~3%,但其相态变化与降水的发生、发展直接相关(盛裴轩等,2003)。因而,高时空分辨率的水汽信息对于气候监测以及强降水天气的短时预警等有重要作用。但水汽时空分布不均、变化大,常规每日 2 次的无线电探空(radiosonde, RS)资料难以满足需求。大气可降水量(precipitable water vapor, PWV)是指从地面到大气顶的单位面积大气柱中所含水汽全部凝结并降落到地面的降水量。地基 GPS 探测的 PWV 资料则有效弥补了常规观测资料的不足,具有成本低、时空分辨率高、解算精度高、全天候等诸多优点(李成才等,1999;王小亚等,1999;李光伟等,2018;段晓梅和曹云昌,2018;胡姮等,2018)。

由于水汽是天气和气候变化的重要指示因子,GPS/PWV 资料已被广泛应用于各地强降水天气过程分析中。通过分析实时水汽与降水的关系发现,降水多发生在 PWV 高于基准值的时段,这可为降水短期预报提供一个明确的水汽演变指标(陈小雷等,2007;丁海燕等,2012;杨莲梅等,2012;郝丽萍等,2013;李曼等,2014)。水汽也是短期数值预报中的重要变量之一,GPS/PWV 可提供与强降水天气紧密联系的水汽信息,因而又被广泛应用于区域数值模式资料同化中。数值试验结果表明,同化 GPS/PWV 可很好地改善模式初始场要素,对提高短期数值预报的强降水预报准确率有明显作用(陈敏等,2010;张晶等,2014;朱丰等,2014)。受地形和大气环流等因素影响,我国不同地区的水汽变化特征及其与降水的关系存在明显差异(张雪梅等,2009;申乐琳等,2010;王宇虹等,2015)。随着

GPS/PWV 观测网的建立和资料的积累,针对大气中水汽的时空分布及变化特征研究更为精细。越来越多的研究集中于区域 PWV 的季节变化、日变化特征,以及降水过程中 PWV 与气象要素的关系等(梁宏等,2010;杨晓春等,2013;石小龙等,2014;任菊章等,2014;马思琪等,2016;黄小燕等,2018)。

新疆位于中国西北边陲,属于干旱半干旱气候,天山山脉横亘中部。统计结果表明,新疆日降水量和年降水量的大值区均分布在天山山区(张家宝和邓子凤,1987;张建新等,2004)。由于观测资料匮乏,早期仅能利用稀疏的探空资料进行大气可降水量和降水转化率方面的研究(李霞和张广兴,2003)。2003 年,中国气象局乌鲁木齐沙漠气象研究所和美国 UCAR 在新疆地区首次开展 GPS/PWV 探测项目,选取乌鲁木齐为基准站,开展地基 GPS/PWV 检测工作;至 2012 年,完成沿天山山区 12 个地基 GPS 观测站布设,初步建成天山山区 GPS 观测网(赵玲等,2006)。但近几年的研究多集中在强降水个例中 GPS/PWV 的变化及其与气象要素之间的关系(杨莲梅等,2012;李曼等,2014;刘晶和杨莲梅,2017;刘晶等,2017),较少涉及天山山区 PWV 精细的时空变化特征。天山山区夏季降水可占全年总降水量的 40%~50%,因此,本文拟利用天山山区 2012—2015 年的 GPS/PWV 观测资料,针对该地区夏季 PWV 的时空分布特征进行细致分析,从而进一步深入了解天山山区的水汽气候特征,为天山山区降水预报提供一定的参考。

## 1 资料简介

图 1 为天山山区 11 个地基 GPS 站点分布图。各站可自动收集、整理和传输探测资料,最后利用

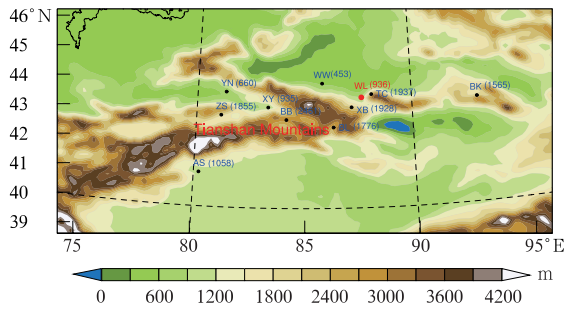


图 1 天山山区地基 GPS 站点位置(点)及其地形分布(彩色和数字;海拔高度,单位:m)分布(字母表示站点简称。AS:阿克苏, BB:巴音布鲁克, BL:巴仑台, BK:巴里坤, TC:天池, XY:新源, YN:伊宁, WL:乌鲁木齐, WW:乌兰乌苏, XB:白杨沟, ZS:昭苏,下同)

Fig. 1 Distribution of the ground-based GPS stations (dots) and terrain (colors and digits; altitudes, unit; m) over the Tianshan Mountains

(Capital letters indicate the abbreviations of the stations.  
AS: Aksu, BB: Bayanbulak, BL: Balguntay, BK: Barkol,  
TC: Tianchi, XY: Xinyuan, YN: Yining, WL: Urumqi,  
WW: Wulanwusu, XB: Baiyanggou, ZS: Zhaosu,  
hereafter inclusive)

GAMIT(GPS analysis at MIT)解算软件处理 GPS 资料,反演得到 0.5 h 间隔的 GPS/PWV 数据,其准确性已得到验证(赵玲等,2006)。本文主要利用天山山区 2012—2015 年夏季(6—8 月)时段的观测资料,细致分析该地区夏季 PWV 的时空分布特征。在统计分析前,先对 GPS/PWV 资料进行初步质量控制,剔除了由于仪器检修和缺测等造成的无效数据。

为进一步验证研究时段资料的可靠性,利用乌鲁木齐、阿克苏和伊宁三站逐日 2 次(00 时和 12 时,世界时,下同)的探空资料计算大气可降水量,与对应 GPS/PWV 资料进行比较。为探究天山山区夏季 PWV 与降水之间的关系,利用新疆气象信息中心提供的逐日(00 时至次日 00 时)降水量资料,挑选出图 1 中 11 站对应研究时段的有雨日和无雨日。

## 2 GPS/PWV 数据验证

本文根据 Zhai and Eskridge(1997)的方法,利用 00 时和 12 时两个时次的探空数据计算得到 PWV。图 2 为阿克苏、乌鲁木齐和伊宁三站两种

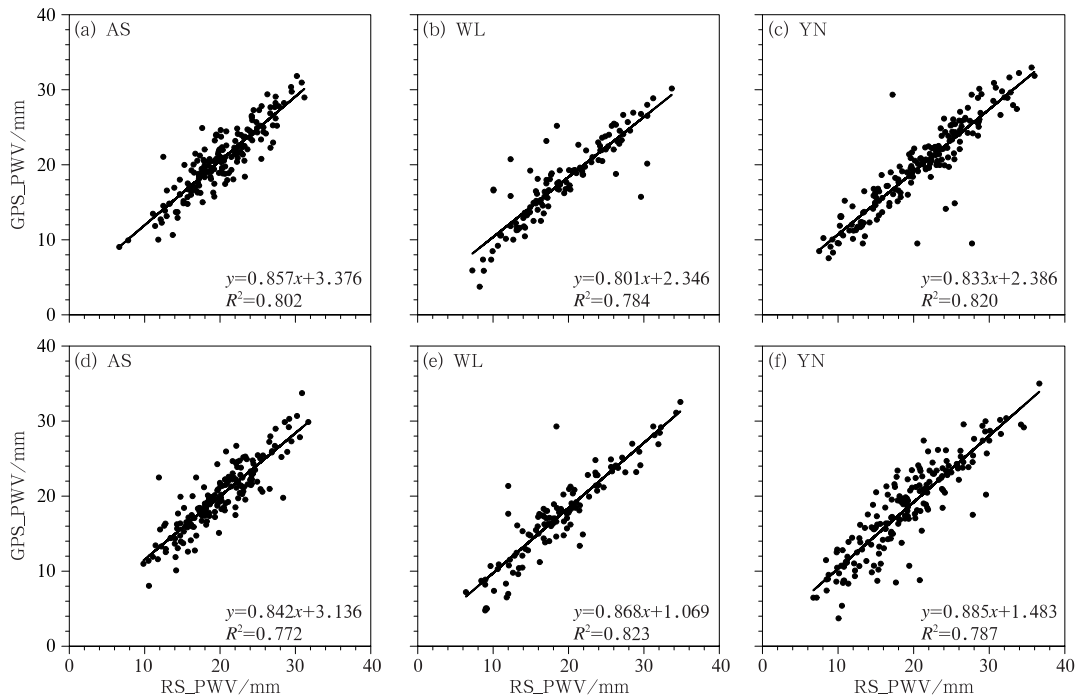


图 2 阿克苏(a,d)、乌鲁木齐(b,e)和伊宁(c,f)三站 00 时(a,b,c)和 12 时(d,e,f) GPS 探测与探空站(RS)的 PWV 散点分布

Fig. 2 Scatter plots of PWV determined by GPS and radiosonde at 0000 UTC (a, b, c) and 1200 UTC (d, e, f) at Aksu (a, d), Urumqi (b, e) and Yining (c, f) Stations, respectively

PWV 资料的散点分布,可以看出, GPS/PWV 整体上略小于 RS/PWV,这与以往其他地区的验证结果一致(杨晓春等,2013;石小龙等,2014;马思琪等,2016;付志康等,2017)。两种资料的 PWV 绝大部分密集分布在拟合直线附近,其拟合直线斜率均超过 0.8,且 12 时的资料更接近 1.0。两种资料的 PWV 的相关性也较高,均可通过 0.01 的显著性水平检验。因此,本文中所用的 GPS/PWV 资料具有较高的可信度。

### 3 天山山区夏季 GPS/PWV 时空特征

#### 3.1 PWV 平均特征

图 3 为 2012—2015 年天山山区夏季平均 PWV 的空间分布。可以看出,各站点间大气 PWV 差异显著。中天山北坡的乌兰乌苏、伊犁河谷的伊宁和新源以及西天山南坡的阿克苏四站的 PWV 最高,均在 20 mm 左右;巴音布鲁克最少,不足 12 mm;其他大部分站点分布在 14~16 mm。进一步查看各站点夏季平均 PWV 与其海拔高度的散点图(图 4)可知,二者呈显著的负相关关系,其相关系数可达 -0.95,即 PWV 随海拔高度的增加而减少。这与 PWV 的基本定义也是对应的。

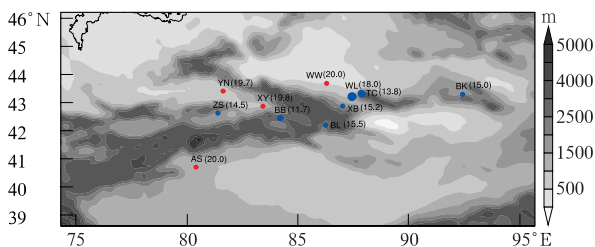


图 3 2012—2015 年天山山区夏季平均 PWV 的空间分布

(圆点大小与 PWV 成正比,红点表示超过 19 mm 的站点,阴影为海拔高度)

Fig. 3 Distribution of the averaged PWV in summer over the Tianshan Mountains during 2012—2015

(The dot size is proportional to the value of PWV, and the red dots represent the stations where PWV exceeds 19 mm, shaded areas indicate the altitude)

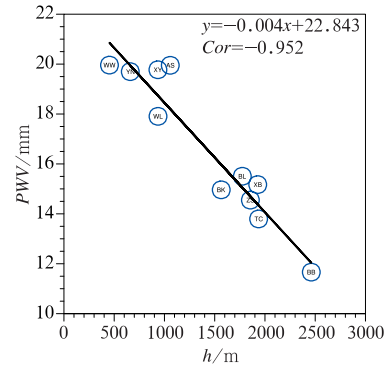


图 4 2012—2015 年天山山区 11 站的夏季平均 PWV 与其海拔高度的散点图

Fig. 4 Scatter plot of averaged PWV in summer and height at the 11 GPS stations over the Tianshan Mountains during 2012—2015

为进一步分析天山山区夏季 PWV 的分布特征,将各站点 2012—2015 年夏季的逐半小时数据由小到大排列,得到其中位数、四分位数和极值等,最终采用箱型图表示,如图 5 所示。图 5a 为天山山区 11 站(按照海拔高度由高到低排列)夏季 PWV 的箱型图。可以看出,不同站点夏季 PWV 分布特征存在显著差异。各站点之间的 PWV 极小值比较接近,极大值总体随海拔高度的降低而增大,其四分位数和中位数也表现出一致的特征。总体而言,低海拔站点 PWV 比高海拔站点的发散性和可变性更大。为探究夏季 PWV 与降水的关系,先根据各站点研究时段的逐日降水量挑选出有雨日和无雨日,分别给出其箱型图(图 5b,5c)。可以看出,各站点 PWV 的整体分布趋势与整个夏季分布一致,但有雨日 PWV 的极值、中位数等明显高于无雨日。

#### 3.2 PWV 时间特征

图 6 为 2012—2015 年天山山区 11 站夏季 PWV 的月变化。可以看出,各站的 PWV 月平均值仍随站点海拔高度的降低而增加。各站 PWV 存在显著的月变化,大部分站点在 7 月最多,6 月次之,8 月最少。但阿克苏站 PWV 的最小值出现在 6 月,8 月次之,这可能与特殊的地理环境和降水特征有关(胡翠珍等,2007)。

进一步探究天山山区 PWV 值的日变化特征。

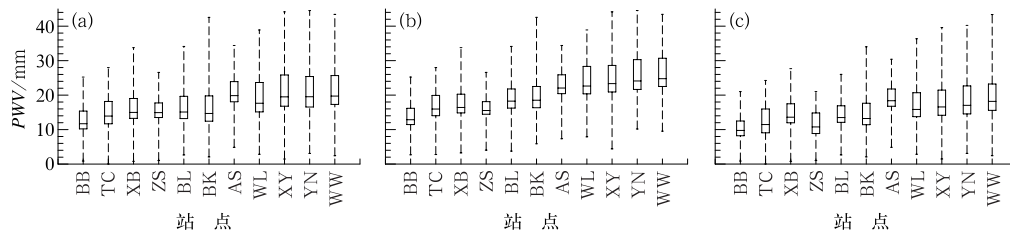


图 5 2012—2015 年天山山区 11 站夏季 PWV 的箱型图  
(站点按照海拔高度由高到低排列,下同)  
(a) 整个夏季,(b)有雨日,(c)无雨日

Fig. 5 Box plots of PWV in summer at 11 GPS stations over the Tianshan Mountains during 2012—2015  
(Stations are arranged by terrain height, hereafter in clusive)  
(a) whole summer days, (b) rain days, (c) rainless days

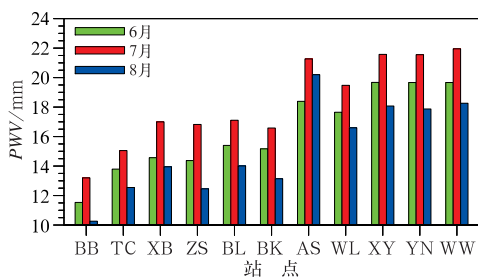


图 6 2012—2015 年天山山区 11 站夏季 PWV 的月变化

Fig. 6 Monthly variation of summer PWV at 11 GPS stations over the Tianshan Mountains during 2012—2015

由图 7a 可知,各站均存在显著的日变化。大部分站点在 03—04 时出现最小值,随后迅速增加,在 10 时左右达到最大值;而后缓慢减小。值得注意的是,虽然新源、伊宁和阿克苏夏季平均 PWV 值较高(图 3),却表现出相反的日变化特征,在 10 时附近出现最小值。在有雨日(图 7b),各站 PWV 值明显高于夏季平均(图 7a),且其日变化特征也与之类似,一部分站点变化非常平缓,日变化特征并不显著,如新源、伊宁、巴里坤、巴伦台和阿克苏。在无雨日(图 7c),各站的 PWV 值更接近且低于夏季平均(图 7a),大部分站点仍在 10 时左右出现日最大值。但新源、伊宁和阿克苏表现出几乎相反的变化特征,在 10 时左右出现 PWV 最小值。可见,在有雨日局地 PWV 会因水汽输送等原因而显著增加,这可为

降水预报提供一定的指示作用。

### 3.3 降水量与 PWV 的关系

图 8 为 2012—2015 年天山山区 11 站的夏季 PWV 和累积降水量的月变化。可以看出,各站累积降水量与其平均 PWV 的关联性不明显,甚至个别站点在个别月份的累积降水量还不及 PWV,反而与站点海拔高度呈现出较好的相关性。各站逐月平均降水量与其海拔高度的散点图(图略)也可证实这一点,尤其 7 月二者相关系数高达 0.90。以往的统计和模拟研究也表明,天山地形的阻挡抬升作用对其局地降水的形成和发展过程影响显著,在一定范围内,降水量会随着海拔高度的增加而增加(赵勇等,2010;于晓晶和赵勇,2016)。

定义月平均降水量与月平均 PWV 的比值为月水分循环指数(刘国纬,1997;张学文,2013),据此计算各站逐月的水分循环指数。图 9 给出各站水分循环指数与海拔高度的关系,可以看出随着站点海拔高度的增加,其水分循环指数随之增加。夏季 3 个月水分循环指数与海拔高度的相关系数分别可达到 0.849、0.946、0.760。这可能由于夏季 7 月温度最高,天山山区高海拔站点更易产生局地对流性降水,增加水分循环次数。综上分析,天山山区夏季局地 PWV 的增加只为降水的发生提供一定的基础条件,而因地形导致的抬升运动等动力条件可能发挥着更为重要的作用。

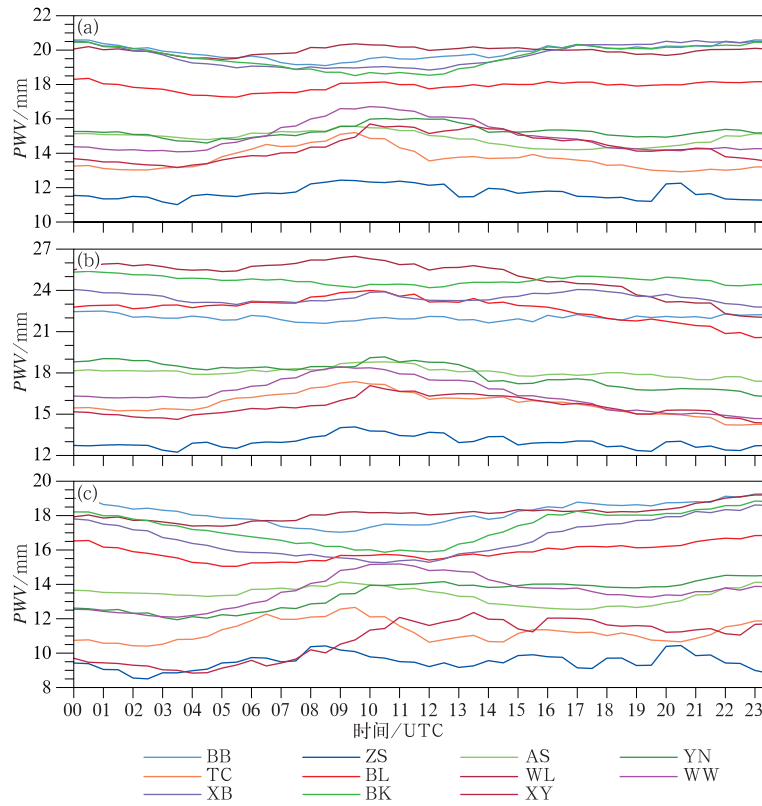


图 7 2012—2015 年天山山区 11 站夏季 PWV 的日变化  
(a) 整个夏季, (b) 有雨日, (c) 无雨日

Fig. 7 Diurnal variation of PWV in summer at 11 GPS stations over the Tianshan Mountains during 2012–2015  
(a) whole summer days, (b) rain days, (c) rainless days

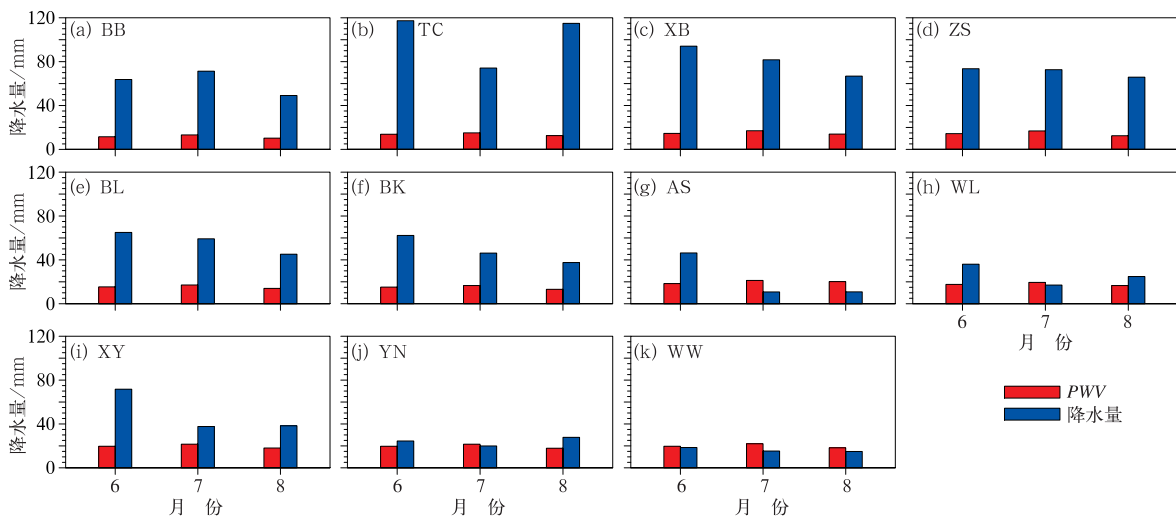


图 8 2012—2015 年天山山区 11 站 (a~k) 的夏季 PWV 和累积降水量的月变化

Fig. 8 Monthly variations of PWV and observed precipitation in summer at 11 GPS stations (a–k) over the Tianshan Mountains during 2012–2015

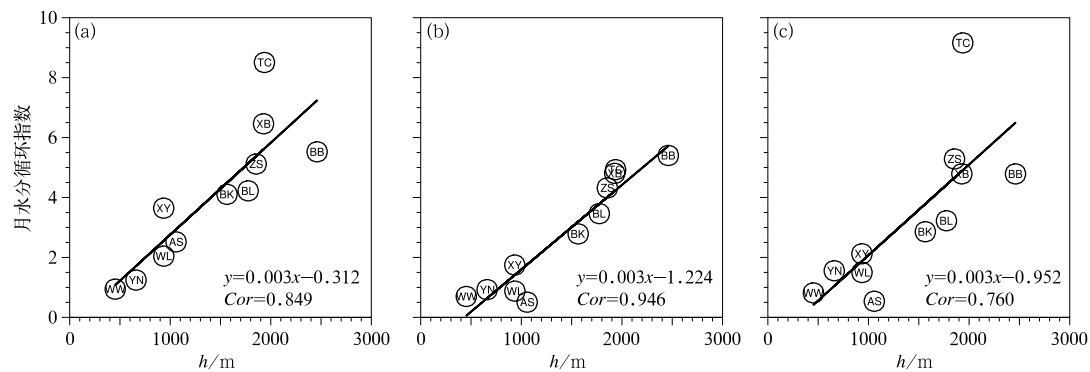


图 9 天山山区 11 站的水分循环指数与其海拔高度的散点图

(a)6 月,(b)7 月,(c)8 月

Fig. 9 Scatter plots of the water cycle index and height at the 11 stations over the Tianshan Mountains

(a) June, (b) July, (c) August

## 4 结论与讨论

基于新疆天山山区 2012—2015 年夏季逐 0.5 h 的 GPS/PWV 资料、逐日 2 次的探空资料和逐日降水资料,运用多种统计研究方法,分析天山山区夏季大气可降水量的特征,并初步探讨其原因。

(1) 从平均值分布来看,天山山区各站 PWV 分布存在明显差异,且 PWV 与海拔高度呈显著负相关关系,即站点 PWV 随其海拔高度的增加而减少,这与大气可降水量的基本定义是一致的。从箱型图来看,低海拔站点 PWV 比高海拔站点的发散性和可变性更大,有雨日 PWV 的极值、中位数等整体高于无雨日。

(2) 天山山区夏季 PWV 存在显著的月变化和日变化。月变化中 7 月 PWV 最大,6 月次之,8 月最少;日变化中一般在 10 时左右出现 PWV 的最大值。相比无雨日,有雨日局地 PWV 会显著增加,这可为降水预报提供一定的指示作用。另外,个别站点表现出不同的月变化和日变化特征,这可能与当地特殊的地理环境和气象条件有关,还有待进一步细致探究。

(3) 最后讨论降水与 PWV 的关系,天山山区各站降水量与其 PWV 关联性不明显,而与其海拔高度密切相关,且水分循环指数也与海拔高度呈显著正相关。这主要由于夏季山区高海拔站点更易产生局地对流性降水,增加水分循环次数,最终降水量

较多。可见,天山山区夏季局地 PWV 的增加只为降水的发生提供一定的基础条件,而因地形导致的抬升运动等动力条件可能发挥着更为重要的作用。

## 参考文献

- 陈敏,范水勇,仲跻芹,等,2010. 全球定位系统的可降水量资料在北京地区快速更新循环系统中的同化试验[J]. 气象学报,68(4): 450-463. Chen M, Fan S Y, Zhong J Q, et al, 2010. An experimental study of assimilating the global position system precipitable water vapor observations into the rapid updated cycle system for the Beijing Area[J]. Acta Meteor Sin, 68(4): 450-463 (in Chinese).
- 陈小雷,景华,全美然,等,2007. 地基 GPS 遥测大气可降水量在天气分析诊断中的应用[J]. 气象,33(6): 19-24. Chen X L, Jing H, Tong M R, et al, 2007. Weather diagnostic analysis of the precipitable water vapor by ground based GPS[J]. Meteor Mon, 33(6): 19-24 (in Chinese).
- 丁海燕,李青春,郑祚芳,等,2012. 利用北京 GPS 监测网分析夏季暴雨的水汽特征[J]. 应用气象学报,23(1): 47-58. Ding H Y, Li Q C, Zheng Z F, et al, 2012. Characteristics of precipitable water vapor of summer rainstorm based on Beijing GPS-MET network [J]. J App Metro Sci, 23(1): 47-58 (in Chinese).
- 段晓梅,曹云昌,2018. 北斗和 GPS 反演大气可降水量的对比分析[J]. 气象,44(12): 1575-1582. Duan X M, Cao Y C, 2018. Comparison of atmospheric precipitable water vapor retrieved by Beidou and GPS[J]. Meteor Mon, 44(12): 1575-1582 (in Chinese).
- 付志康,万蓉,于胜杰,等,2017. 湖北地基 GPS 大气可降水量变化特征分析及应用[J]. 气象科学,37(4): 553-560. Fu Z K, Wan R, Yu S J, et al, 2017. Analysis and application of ground-based

- GPS precipitable water vapor characteristics[J]. *J Meteor Sci*, 37(4):553-560(in Chinese).
- 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. Hao L P, Deng J, Li G P, et al, 2013. Characteristics of GPS vapor in a persistent heavy rainfall related to southwest vortex[J]. *J App Meteor Sci*, 24(2):230-239(in Chinese).
- 胡翠珍, 胡旗武, 沈焕琦, 等, 2007. 阿克苏地区大降水天气的气候特征[J]. *沙漠与绿洲气象*, 1(5):25-28. Hu C Z, Hu Q W, Shen H Q, et al, 2007. Climatic characteristics of heavy rain weather in Akesu Area[J]. *Desert and Oasis Meteorology*, 1(5):25-28(in Chinese).
- 胡姮, 曹云昌, 尹聪, 等, 2018. 青藏高原大气可降水量单站观测对比分析[J]. *气象学报*, 76(6):1029-1039. Hu H, Cao Y C, Yin C, et al, 2018. A comparative analysis of precipitable water vapor in the Tibetan Plateau[J]. *Acta Meteor Sin*, 76(6):1029-1039(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).
- 李成才, 毛节泰, 李建国, 等, 1999. 全球定位系统遥感水汽总量[J]. *科学通报*, 44(3):333-336. Li C C, Mao J T, Li J G, et al, 1999. Water vapor content derived from ground-based GPS observations [J]. *Chin Sci Bull*, 44(3):333-336(in Chinese).
- 李光伟, 黄彦彬, 敖杰, 等, 2018. GPS 探测与 FY-2 反演大气可降水量对比分析[J]. *气象*, 44(8):1082-1093. Li G W, Huang Y B, Ao J, et al, 2018. Comparison of precipitable water retrieved by FY-2 satellite and GPS observations[J]. *Meteor Mon*, 44(8):1082-1093(in Chinese).
- 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. Li M, Yang L M, Zhao L, 2014. Snowfall derived from ground-based GPS in a heavy snowfall process in the Tianshan Mountains [J]. *Arid Zone Res*, 31(5):915-921(in Chinese).
- 李霞, 张广兴, 2003. 天山可降水量和降水转化率的研究[J]. *中国沙漠*, 23(5):509-513. Li X, Zhang G X, 2003. Research on precipitable water and precipitation conversion efficiency around Tianshan Mountain Area[J]. *J Desert Res*, 23(5):509-513(in Chinese).
- 梁宏, 刘晶森, 陈跃, 2010. 地基 GPS 遥感的祁连山区夏季可降水量日变化特征及其成因分析[J]. *高原气象*, 29(3):726-736. Liang H, Liu J M, Chen Y, 2010. Characteristics and cause of diurnal variation of precipitable water vapor derived from ground-based GPS in Qilian Mountains in summer[J]. *Plateau Meteor*, 29(3):726-736(in Chinese).
- 刘国纬, 1997. 水文循环的大气过程[M]. 北京:科学出版社:67. Liu G W, 1997. Atmospheric process in the hydrological cycle[M]. Beijing: Science Press:67(in Chinese).
- 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. Liu J, Yang L M, 2017. Development features of GPS atmospheric precipitable water vapor in heavy rainfall caused by central Asia vortex on the north slope of Tianshan Mountain[J]. *Meteor Mon*, 43(6):724-734(in Chinese).
- 刘晶, 曾勇, 刘雯, 等, 2017. 伊犁河谷和天山北坡暴雨过程水汽特征分析[J]. *沙漠与绿洲气象*, 11(3):74-80. Liu J, Zeng Y, Liu W, et al, 2017. Analysis of water vapor characteristics during the rainstorm process at the Ili River Valley and north slope of Tianshan Mountains[J]. *Desert Oasis Meteor*, 11(3):74-80(in Chinese).
- 马思琪, 周顺武, 王烁, 等, 2016. 基于 GPS 资料分析西藏中东部夏季可降水量日变化特征[J]. *高原气象*, 35(2):318-328. Ma S Q, Zhou S W, Wang S, et al, 2016. Diurnal variation characteristics of GPS-retrieved precipitable water vapor over Mid-East Xizang in summer[J]. *Plateau Meteor*, 35(2):318-328(in Chinese).
- 任菊章, 孙绩华, 李建, 等, 2014. 云南地区 GPS 探测与 3 类再分析资料降水量的对比分析[J]. *高原气象*, 33(6):1480-1489. Ren J Z, Sun J H, Li J, et al, 2014. Comparison of precipitation in Yunnan from GPS observation data and three reanalysis data[J]. *Plateau Meteor*, 33(6):1480-1489(in Chinese).
- 石小龙, 尚伦宇, 尹远渊, 等, 2014. 大连地区 GPS 反演大气可降水量的变化特征[J]. *高原气象*, 33(6):1648-1653. Shi X L, Shang L Y, Yin Y Y, et al, 2014. Variation characteristics of precipitable water vapor inverted by GPS in Dalian[J]. *Plateau Meteor*, 33(6):1648-1653(in Chinese).
- 申乐琳, 何金海, 周秀骥, 等, 2010. 近 50 年来中国夏季降水及水汽输送特征研究[J]. *气象学报*, 68(6):918-931. Shen Y L, He J H, Zhou X J, et al, 2010. The regional variabilities of the summer rainfall in China and its relation with anomalous moisture transport during the recent 50 years[J]. *Acta Meteor Sin*, 68(6):918-931(in Chinese).
- 盛裴轩, 毛节泰, 李建国, 等, 2003. 大气物理学[M]. 北京:北京大学出版社:18-19. Sheng P X, Mao J T, Li J G, et al, 2003. Atmospheric Physics[M]. Beijing: Peking University Press:18-19(in Chinese).
- 王小亚, 朱文耀, 严豪健, 等, 1999. 地面 GPS 探测大气可降水量的初步结果[J]. *大气科学*, 23(5):605-612. Wang X Y, Zhu W Y, Yan H J, et al, 1999. Preliminary results of precipitable water vapor monitored by ground-based GPS[J]. *Chin J Atmos Sci*, 23(5):605-612(in Chinese).
- 王宇虹, 徐国强, 贾丽红, 等, 2015. 太行山对北京“7. 21”特大暴雨的影响及水汽敏感性分析的数值研究[J]. *气象*, 41(4):389-400. Wang Y H, Xu G Q, Jia L H, et al, 2015. Numerical simulation analysis on impact of Taihang Mountain and vapor sensitivity on the 21 July 2012 extremely severe rainstorm in Beijing[J]. *Meteor Mon*, 41(4):389-400(in Chinese).



- 杨莲梅,王世杰,史玉光,等,2012. 乌鲁木齐夏季强降水过程 GPS-PWV 的演变特征[J]. 高原气象,31(5):1348-1355. Yang L M, Wang S J, Shi Y G, et al, 2012. Evolution feature of precipitable water vapor derived from ground-based GPS during summer heavy precipitation in Urumqi[J]. Plateau Meteor, 31(5):1348-1355(in Chinese).
- 杨晓春,王建鹏,白庆梅,等,2013. 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,31(2):278-282. Yang X C, Wang J P, Bai Q M, et al, 2013. Characteristic analysis of GPS/PWV changes during seasonal precipitation processes in Xi'an of Shanxi Province[J]. J Arid Meteor, 31(2):278-282(in Chinese).
- 于晓晶,赵勇,2016. 地形对天山夏季降水影响的模拟[J]. 中国沙漠,36(4):1133-1143. Yu X J, Zhao Y, 2016. Simulation of orographic effects on summer rain in the Tianshan Mountains[J]. J Desert Res, 36(4):1133-1143(in Chinese).
- 张家宝,邓子风,1987. 新疆降水概论[M]. 北京:气象出版社,160-174. Zhang J B, Deng Z F, 1987. Introduction of Precipitation in Xinjiang[M]. Beijing: China Meteorological Press: 160-174(in Chinese).
- 张建新,廖飞佳,王文新,等,2004. 中天山北坡云与降水的气候特征[J]. 新疆气象,27(5):25-34. Zhang J X, Liao F J, Wang W X, et al, 2004. The climatic characteristics of cloud and precipitation in northern slope of middle Tianshan Mountains in Xinjiang[J]. Xinjiang Meteor, 27(5):25-34(in Chinese).
- 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. Zhang J, Gu S S, Chu Z G, et al, 2014. Assimilation of GPS/PWV data in LAPS and its application in precipitation forecasts[J]. Meteor Mon, 40(1):76-85(in Chinese).
- 张雪梅,江志红,刘晓东,等,2009. 东亚地区水汽输送强、弱年水汽输送的异同[J]. 气象学报,67(4):561-568. Zhang X M, Jiang Z H, Liu X D, et al, 2009. The differences and sames of vapor transportation between strong vapor transportation year and weak one in the East-Asia[J]. Acta Meteor Sin, 67(4):561-568(in Chinese).
- 张学文,2013. 对大气可降水量、降水转化率概念的质疑与讨论[EB/OL]. <http://blog.sciencenet.cn/blog-2024-677085.html>.
- Zhang X W, 2013. Questions and discussions for the definitions of precipitable water vapor and precipitation conversion efficiency[EB/OL]. <http://blog.sciencenet.cn/blog-2024-677085.html>(in Chinese).
- 赵玲,梁宏,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. Zhao L, Liang H, Cui C X, 2006. Solution and application of the ground-based GPS data in Urumqi, Xinjiang[J]. Arid Zone Res, 23(4):654-657(in Chinese).
- 赵勇,邓学良,李秦,等,2010. 天山地区夏季极端降水特征及气候变化[J]. 冰川冻土,32(5):927-934. Zhao Y, Deng X L, Li Q, et al, 2010. Characteristics of the extreme precipitation events in the Tianshan Mountains in relation to climate change[J]. J Glaci Geocry, 32(5):927-934(in Chinese).
- 朱丰,徐国强,李莉,等,2014. 同化青藏高原地区 GPSPW 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. Zhu F, Xu G Q, Li L, et al, 2014. An assessment of the impact on precipitation prediction in the middle and lower reaches of the Yangtze River made by assimilating GPSPW data in the Tibetan Plateau[J]. Chin J Atmos Sci, 38(1):171-189(in Chinese).
- Zhai P, Eskridge R E, 1997. Atmospheric water vapor over China[J]. J Climate, 10:2643-2652.