于碧馨,刘晶,安大维,等.2017—2019年南疆西部和昆仑山北坡 GPS 大气可降水量变化特征[J].沙漠与绿洲气象,2022,16(6):25-33. doi:10.12057/j.issn.1002-0799.2022.06.004

开放科学(资源服务)标识码(OSID):

# 2017—2019 年南疆西部和昆仑山北坡 GPS 大气可降水量变化特征

于碧馨<sup>1</sup>,刘 晶<sup>2,3</sup>,安大维<sup>1</sup>,张云惠<sup>1\*</sup>

(1.新疆气象台,新疆 乌鲁木齐 830002;2.中国气象局乌鲁木齐沙漠气象研究所,新疆 乌鲁木齐 830002;
 3.中亚大气科学研究中心,新疆 乌鲁木齐 830002)

摘要:基于 2017—2019 年南疆地基 GPS 大气可降水量(简称"GPS-PWV")、常规探空水汽 廓线计算的大气可降水量(简称"RS-PWV")和逐时降水资料,统计分析南疆西部和昆仑山北坡 GPS-PWV 时空变化特征、夏季不同海拔高度不同降水量级下 GPS-PWV 变化与实际降水的对应 关系。结果表明:(1)南疆西部和昆仑山北坡 GPS-PWV 与 RS-PWV,二者具有很高的相关性。 (2)不同海拔高度站点 GPS-PWV 空间分布差异明显,大部分站点 GPS-PWV 随海拔高度的增加 而降低。(3)各站点 GPS-PWV 逐月变化均呈单峰型,冬季 12 月或1 月最小,夏季 7、8 月最大;春、 夏季各站 GPS-PWV 距平日变化为单峰型,秋、冬季 GPS-PWV 距平日变化除秋季乌恰站、若羌站 为单峰型外,其他均为三峰或四峰型。(4)各站有、无降水时 PWV 平均值差异明显,昆仑山北坡差 异更大;降水发生前 GPS-PWV 已开始上升,南疆西部 PWV 峰值主要出现在降水前 0~1 h,昆仑山 北坡 PWV 峰值主要出现在降水前 0~3 h和 7~9 h。

关键词:大气可降水量;地基 GPS;南疆西部;昆仑山北坡;时空变化特征 中图分类号:P456 文献标识码:A 文章编号:1002-0799(2022)06-0025-09

天山东西横亘 2 500 km、平均海拔 4 000 m,将 新疆分为南、北疆,天山以南称为南疆,常年干旱少 雨,属典型的干旱内陆性荒漠气候,但近年来降水呈 现年代际增多趋势,且强降水频发,屡破极值。水汽 作为成云致雨的必要条件,对辐射收支、水循环、天 气演变和气候变化等有重要作用<sup>11-41</sup>。研究表明水汽 条件是干旱区暴雨形成的重要因子之一,水汽输送 的骤然增大和戛然而止与南疆降雨起止时间和暴雨 强度有密切关系<sup>[5]</sup>,水汽的局地变化也对降水有一

收稿日期:2022-09-05;修回日期:2022-11-05

通信作者:张云惠(1968一),正高级工程师,主要从事新疆暴雨(雪) 天气及中亚低涡研究。E-mail:715208285@qq.com 定的指示性作用。传统定义的水汽含量指的是某区 域上空某时刻或者一个较长时期平均的水汽含量, 是一个状态参数<sup>[6]</sup>,但水汽复杂多变且分布极不均 匀,常规探测难以满足获取水汽连续变化特征的需 求<sup>[2-4]</sup>。地基 GPS 水汽遥感探测技术发展有效弥补了 常规探测手段的不足,几乎不受大气环境的影响, 能够真实可靠地反映大气中的水汽变化,可提供 覆盖范围广、高时空分辨率、高精度的大气可降水 量<sup>[7-8]</sup>。一些学者统计了地基 GPS 水汽时空分布特征 指出<sup>[9-12]</sup>,地基 GPS 反演的 PWV 和探空资料计算的 PWV 一致性良好<sup>[10-11]</sup>,部分地区降水前普遍 PWV 增 加<sup>[7-9,11]</sup>,而有的地区强降雨时段多数在 PWV 峰区时 段<sup>[13]</sup>。循环同化 GPS-PWV 资料模拟可有效改善降 水的预报能力,尤其是大雨、暴雨量级以上的降水预 报得到了显著提高<sup>[14]</sup>。

新疆学者们对北疆地区地基 GPS 水汽资料与

基金项目:国家自然科学基金(41965002);中亚大气科学研究基金项目(CAAS202005);第三次新疆综合科学考察项目(2022xjkk1003) 作者简介:于碧馨(1989—),高级工程师,主要从事新疆灾害性天气 研究。E-mail:<u>841089917@qq.com</u>\_

沙漠与绿洲气象 Desert and Oasis Meteorology

降水的关系做了一些研究 [15-18], 伊犁河谷夏季 GPS-PWV 距平日变化幅度与海拔高度呈正相关, 天山山区各站夏季 GPS-PWV 分布与海拔高度呈显 著负相关, 乌鲁木齐强降水过程中 GPS-PWV 有明 显的提前增湿和跃变现象且降水时峰值几乎可达到 气候平均值的2倍左右。但对南疆相关的研究较少, 崔丽娜等 [4] 仅分析了部分时段内的日变化特征。 2003年中国气象局乌鲁木齐沙漠气象研究所开始 搭建新疆地基 GPS/MET 遥感大气水汽观测网,2016 年以前仅建站13个,而目前可用于观测、业务应用 与研究等工作的观测站点有 36 个(其中南疆地区 21个)。因此,本文在分析 2017—2019 年南疆西部 与昆仑山北坡地基 GPS-PWV 变化特征的基础上, 针对夏季不同海拔高度不同降水量级的 GPS-PWV 日变化进行分析,探寻 GPS-PWV 与实际降水的对 应关系,以期为强降水短时临近预报提供参考。

# 1 研究区概况

南疆(73°40′~93°45′E,34°25′~43°36′N)面积约 108万km²,地形呈向东开口的喇叭口形状,地势西 高东低,微向北倾,北部为天山山脉,西部为帕米尔 高原(图1),海拔基本均在3km以上<sup>[19-20]</sup>,南部为与 青藏高原毗邻的昆仑山(海拔基本在5km以上), 中东部为塔克拉玛干沙漠(海拔约0.8~1.5km)。本 文的主要研究区域为南疆西部(蓝圈区域)和昆仑山 北坡(红圈区域),前者地形为大喇叭口型且整体海 拔较高,后者地势南高北低。



#### 2 资料与方法

# 2.1 资料选取

地基 GPS/MET 遥感大气水汽观测资料和降水 资料均由新疆气象信息中心提供,时间分辨率为1h。 文中的春、夏、秋、冬四季分别对应的是3—5月、6— 8月、9—11月、12月一次年2月。

选用 2017—2019 年南疆西部、昆仑山北坡各 6 个地基 GPS/MET 遥感大气水汽观测站资料(图 1), 经整理剔除由于仪器维修、故障造成异常数据和无 效数据,利用 GAMIT 软件处理原始资料反演得到逐时的 GPS-PWV。南疆西部地处帕米尔高原的布伦 口乡站海拔最高,为 3 320 m;海拔次高的乌恰站在 帕米尔高原北部,为 1 396 m;海拔最低的库车站在 天山南麓中部,为 1 082 m。昆仑山北坡海拔最高的 观测站是昆仑山与塔克拉玛干沙漠之间的于田站, 为1 422 m;其次是民丰站、和田站,分别为 1 410 和 1 375 m,位于昆仑山北麓、塔克拉玛干沙漠东缘的 若羌站海拔最低,为 888 m(表 1)。

表1 研究区域 GPS 观测站点和资料信息

站号	站名	海拔/m	代表区域的地理环境
51627	乌什	1 396	塔里木盆地西北边缘,天山南麓西部,托什干河上游,县境内8条河流
51644	库车	1 082	塔里木盆地北缘,天山南麓中部,南靠塔克拉玛干沙漠,市境内3条河流
51705	乌恰	2 176	塔里木盆地西端,帕米尔高原北部,天山南麓与昆仑山接合处,县境内2条河流
Y6051	布伦口乡	3 320	帕米尔高原
51716	巴楚	1 117	天山南麓,塔克拉玛干沙漠西部边缘,叶尔羌河、喀什噶尔河下游
51814	叶城	1 360	喀喇昆仑山和昆仑山脉北麓,塔克拉玛干沙漠南缘,叶尔羌河上游,县境内3条河流
51828	和田	1 375	塔里木盆地西南部,昆仑山与塔克拉玛干大沙漠之间,市境内1条河流
51931	于田	1 422	昆仑山与塔克拉玛干沙漠之间,县境内11条河流
51839	民丰	1 410	塔里木盆地南缘,喀什塔什山和昆仑山山脉北麓,县境内5条河流
51747	塔中	1 099	塔克拉玛干沙漠腹地
51855	且末	1 247	塔里木盆地东南缘,昆仑山和阿尔金山北麓,县境内8条河流
51777	若羌	888	塔里木盆地东南部,昆仑山北麓,塔克拉玛干沙漠东缘,县境内14条河流

# **2.2** GPS-PWV 可信度检验

利用美国怀俄明大学(University of Wyoming, UW)大气科学系网站(http://weather.uwyo.edu)基于 全球交换站常规探空观测资料计算得到的 RS-PWV,进行 GPS-PWV 精度检验。研究区域内具备地 基 GPS/MET 遥感大气水汽观测能力的站点中仅库 车、和田、民丰、若羌4站有探空数据,因此选择可用 于对比检验资料样本数相对更多的库车、若羌为本 文中2个区域的代表站,且这2站 GPS 站和探空站 均在当地气象观测站内,满足对比条件。

以 2019 年逐日 08、20 时(北京时,下同)RS-PWV 为代表,分别比较验证 GPS-PWV 的准确性。 根据库车、若羌两站(南疆西部和昆仑山北坡代表站 中海拔最低站点)逐日探空资料,计算出每日两次的 RS-PWV 值并与相应时刻的 GPS-PWV 值进行比 较,图 2 为两站 08、20 时的 GPS-PWV 与 RS-PWV 散点分布图。2 站 2 个时次 2 套资料的 PWV 散点均 在拟合直线附近密集分布,都具有很高的相关性。库 车站 08、20 时拟合直线斜率分别为 1.045 7 和 1.026 3, 均方根误差(RMSE)分别为 2.15 和 2.06 mm,确定 系数 R<sup>2</sup>分别为 0.921 和 0.933 7 (均通过了 0.05 的 显著性检验); 而若羌站 08、20 时二者拟合也较为一 致, 拟合直线斜率分别为 1.032 6 和 1.051 8, RMSE 分 别达 2.03 和 2.35 mm, 二者间确定系数 R<sup>2</sup>分别为 0.942 和 0.929 7(均通过了 0.05 的显著性检验)。这 2 站的 GPS-PWV 整体略高于 RS-PWV, 这可能是由 于南疆地区上空对流层中下层空气异常偏干<sup>[10]</sup>。 总体来看, 库车站和若羌站的拟合直线斜率均接近 1.0, RMSE 在 2 mm 左右, 确定系数 R<sup>2</sup> 都超过 0.92, 可见其 GPS-PWV 具有较高的精度。

## **3** GPS-PWV 时空变化特征

## 3.1 空间分布

南疆西部和昆仑山北坡不同海拔站点的 GPS-PWV 在 2017—2019 年平均值的空间分布(图 3)有 明显差异,南疆西部库车站和叶城站最大,均为 12.3 mm,其次乌什站、巴楚站均为 11.3 mm,第三是 乌恰站 7.9 mm,布伦口乡站最小为 4.4 mm;昆仑山 北坡若羌站和塔中站最大,均为 11.6 mm,其次是和 田站、且末站,分别为 11.5 和 10.6 mm,第三是民丰



图 2 2019 年库车站(a、b)、若羌站(c、d)逐日 08 时(a、c)、20 时(b、d)GPS-PWV 与 RS-PWV 散点分布

沙漠与绿洲气象 Desert and Oasis Meteorology

站,为9.6 mm,于田站最小,为8.3 mm。这种分布表 明两区域 GPS-PWV 值随海拔高度的增加而减小, 而 PWV 是整层大气柱逐层水汽的累加值,气柱的 相对厚度与海拔高度呈反相关,造成上述现象的原 因与此有一定关系<sup>[5.7,21]</sup>。



3.2 时间变化特征

# 3.2.1 月季分布

分析 2017—2019 年南疆西部(图 4a)和昆仑山 北坡(图 4b)月平均 GPS-PWV 变化可以看到,各站 点的月变化一致,均呈单峰型,7、8 月最大,3—5 月 缓慢上升,5—7 月快速增大,9—11 月迅速下降,冬 季 12 月—次年 2 月最小;南疆西部 7 月最大的是巴 楚站(24.09 mm),8 月最大的为叶城站(26.83 mm);而 昆仑山北坡 7 月最大的为民丰站(28.41 mm),8月最 大的为和田站(25.04 mm)。

季节分布上 GPS-PWV 各站点值由大到小依次 为夏季、秋季、春季、冬季,其中夏季各站点值是秋 季、春季的2倍左右,大部分站点值是冬季的5倍左 右,而塔中、于田站是冬季的7倍。南疆降水的水汽 来源,是西风带低值系统本身携带的水汽、低空急流 的水汽输送和盆地内水汽的集中。夏季副热带系统 活跃,受到欧洲中南部大西洋的偏南水汽输送和盛 行副热带西风急流的共同影响,水汽输送量最大;冬 季水汽输送以西风带携带、地中海向里海汇集与里 海一青藏高原南侧西南向的间接输送为主,但极锋 锋区位置偏北,影响南疆的西风明显减弱,水汽输送 量最小<sup>[22]</sup>。低空急流的水汽辐合为南疆降水天气提 供了一部分偏东水汽补给,据统计偏东低空急流南 疆 5 月最强,其次是 6、8 月,5—8 月东风厚度较厚, 而东风在夏季主要为暖湿型、春季为干冷型<sup>[23]</sup>。这些 可能是造成 PWV 季节变化的原因之一。

# 3.2.2 日变化

新疆不同季节水汽源地、水汽输送路径、水汽输 入量不同,水汽增量也有差异<sup>[1,5,17]</sup>。分析 2017—2019 年4季南疆西部(乌恰站、库车站)与昆仑山北坡(和 田站、若羌站)GPS-PWV 距平日变化(图 5)发现, PWV 日变化特征明显,且相对海拔较高的乌恰站与 和田站日变化特征类似,海拔较低的库车站与若羌 站日变化特征较为一致。

春季乌恰站、和田站 GPS-PWV 距平日变化呈一峰两谷型,谷值均出现在 06 时,随后不断增大,至 10、11 时分别达峰值,和田站逐步减小,到 17—18 时再次降至谷值,而乌恰站则维持大值至 12 时,14 时转为负距平后持续低值至 20 时;库车站、若羌站 GPS-PWV 距平日变化为一峰一谷分布,开始上升时间相对较早,夜间阶段性上升,到 08 时达到最大,随后持续下降,分别至 19、17 时降至最低。

夏季和田站 GPS-PWV 距平日变化为一峰两谷型,04时出现第一次谷值后快速上升,至12时达到峰值后骤降,至20时再次出现谷值。乌恰站 GPS-PWV 距平呈现日变化更剧烈的一峰一谷状态,05— 15时由谷值升至峰值,14—18时维持着高值。库车站与若羌站 GPS-PWV 距平日变化也是一峰一谷型,夜间上升至06时出现最大值,随后缓慢下降,分别在23和22时降到最小,都在22时—次日02时维持着低值。







恰站 GPS-PWV 距平日变化整体大致呈日变幅较大的准单峰型分布,谷值和春季一样出现在 06 时,然后快速上升,11—19 时维持高值并存在 3 个极大值,分别在 11 时、15—16 时、19 时,峰值在 15—16 时、19 时之后开始直线下降。和田站 GPS-PWV 距平日变化呈三峰型,波动较大,峰值出现在03、11、22 时,谷值出现在 00、05、18 时。库车站 GPS-PWV 距平日变化也呈三峰型,峰值出现在 03、11、20 时,谷值出现在 00、06、13 时。若羌站 GPS-PWV 距平日变化转为一峰两谷分布,00 时为谷值,波动上升至 08 时出现峰值,随后又波动下降至 18 时达到谷值。

冬季各站 GPS-PWV 距平日变化呈多峰型,乌 恰站峰值出现在 02、11、13、18 时,库车站峰值出现 在 04、11、14、19 时,和田站峰值出现在 02、11、14、19 时,若羌站峰值出现在 01、11、19 时,各站峰值出现 时刻较为接近。

另外,夏季各站 GPS-PWV 距平日变化幅度最 大,海拔最高的乌恰站日变幅达 3.17 mm,海拔最低 的若羌站日变幅最小(1.4 mm)。由于南疆地区夏季 昼夜温差大,在太阳辐射和下垫面加热的作用下日 出之后迅速升温,大气分子活动剧烈,导致水汽不断 蒸发,空气对水分子容纳能力增强,水汽含量增大, 而随着日落温度快速下降,水汽含量也下降,使得夏 季水汽含量日变幅大<sup>[10]</sup>。这些也与每个站点复杂地 貌和独有的下垫面性质以及局地气候条件有很大的 关系。山区站(如乌恰)PWV 变幅大的原因可能是山区 PWV 基数低,但降水日数相对多,局地短时降雨过程使得水汽快速聚集,大气水汽含量迅速增大<sup>[15]</sup>。

综上所述,各站春、夏季 GPS-PWV 距平日变化 为单峰型分布且峰值强度强,春季高海拔地区峰值 出现在 10-11 时,低海拔地区峰值出现在 08 时,和 夏季相比,高海拔地区峰值早出现 1~5 h,低海拔地 区峰值晚出现2h;秋、冬季 GPS-PWV 距平日变化 除了乌恰站与若羌站的秋季单峰型和外,均为三峰 或四峰型,峰值频次接近,站与站之间峰值日变化存 在一定的规律性,在02时前后、11和19时前后均 出现峰值。由此得出:(1)南疆地区 PWV 峰值在春 夏季节相对更强,降水也集中出现春夏季节[2]。(2) 南疆地区春、夏季大气增湿主要是在夜间,可能是影 响南疆降水"夜雨"四特征的原因之一,而南疆降水 的重要动力机制之一的南疆盆地低空偏东气流具有 夜间增强的日变化特点,同时受山谷风影响,南疆西 部夜间下山风明显[27-28],东西风及其辐合或切变对 低层水汽输送与辐合起着重要作用。(3)冬季主要是 在白天,而秋季则是在后半夜到上午波动式增湿,由 春夏至冬增湿主要时段向后推移,与这3年主要降 水出现前的增湿时段也相对应。(4)同一区域不同海 拔地区增湿时段存在时差,这可能与山谷风及其降 水季节变化、海拔高度差异有关,但因资料年限短且 对大气水汽增湿过程及成因尚未有准确的科学探 索,未来需要更多元化资料作进一步证实。

#### 4 夏季 GPS-PWV 日平均变化与降雨量的关系

南疆地区地形特殊、复杂,降水所需的水汽输送与辐合机制需要中、高、低纬多尺度系统共同作用与有利配合,水汽资源匮乏但对降水的形成极其重要<sup>[19-27]</sup>。考虑到夏季是南疆 GPS-PWV 月变化、日变化较大的季节,利用 2017—2019 年夏季资料分析南疆西部与昆仑山北坡逐日 GPS-PWV 与日降雨量的关系,文中气候平均值为 1976—2009 年各探空站大气可降水量平均值<sup>[29]</sup>。

4.1 有、无雨日和中雨日的 GPS-PWV 变化特征

定量计算 GPS-PWV 研究表明<sup>[22]</sup>,不同降水量 级对应的 PWV 日变化差异明显,且有降水日的平 均 PWV 比无降水日大。按照新疆天气预报业务规 定,日降水量≥6.1 mm 为中雨,降水量≥0.1 mm 为 有雨,无雨或降水量< 0.1 mm 为无雨日。利用以下 公式分别计算有、无降雨情况下 PWV 平均值进行 双样本 T 检验<sup>[30]</sup>。

$$T = \frac{\overline{P_{WV_1}} - \overline{P_{WV_2}}}{\sqrt{\frac{(n_1 - 1)s_1^2 - (n_2 - 1)s_2^2}{n_1 - n_2}} \times (\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2})} \quad . \tag{1}$$

式中, $\overline{P_{WV_1}}$ 和  $\overline{P_{WV_2}}$ 分别为有、无降水日的 PWV 平均 值; $n_1$ 和  $n_2$ 分别为有、无降水日的样本量; $s_1^2$ 和 $s_2^2$ 分 别为有、无降水日 PWV的方差。

夏季南疆西部有降水日数远多于昆仑山北坡, 且高海拔站多于低海拔站(表1)。多数有降水时对 应着日均 PWV 峰值,且大于气候平均值,有降水时 日均 PWV 达到峰值的比例乌恰站占 89%, 库车站 占 91.2%,和田站占 66.7%,若羌站占 85%;而所有 出现日均PWV 峰值但未出现降水的比例乌恰站占 14.7%, 库车站占 28.8%, 和田站占 67.8%, 若羌站占 62.2%。可以得出:(1)南疆西部地区降水前增湿是 日内骤增,水汽迅速积聚所致。(2)同样达到大气水 汽含量最大时,昆仑山北坡相对不易产生降水,一是 可能产生降水的其他必要条件不足或者要求更高; 二是影响南疆降水的主要影响系统南支槽型、中亚偏 南低槽型、低涡型、巴尔喀什湖低槽型中,南疆西部 地区有利影响系统为前三型,而对于昆仑山北坡降 水则主要是最后一型,出现频率相对较低;三是受到 地理位置与地形地貌影响, 盛行的西风带系统进入 新疆后产生稳定低空偏东气流及东西风切变,在南 疆西部动力与地形抬升更为剧烈, 而昆仑山北坡降

水则需要更强的动力抬升条件和更好的云低增长条 件<sup>[31]</sup>。

南疆西部 2 站夏季有降水量日数平均为 74 d, 占总日数的 30.83%,其中中雨日数平均为 14 d,占 夏季有降水日数的 5.83%。无降水日、有降水日、中 雨日 2 站 PWV 平均分别为 17.5、20.6、21.4 mm,中 雨日仅比有降水日大 0.8 mm。昆仑山北坡 2 站季有 降水日平均为 23.5 d,占总日数的 8.51%,和田站仅 有 5 d 中雨日,若羌站无中雨日。2 站无降水日 PWV 为 21.7 mm,有降水日 2 站 PWV 平均可达 29.1 mm, 和田站中雨日 PWV 为 29.0 mm。

计算各站夏季有、无降水日 PWV 平均值的合成 T 检验值(均通过了 0.05 的显著性检验)发现,南 疆西部和昆仑山北坡有、无降水时 PWV 平均值 T 检验都存在显著差异,且两区域都是低海拔地区比 高海拔地区差异更明显(T 检验值相差 5 左右),昆 仑山北坡 T 检验比南疆西部差异更大,T 检验值在 10 以上。

表1 2017—2019 年夏季南疆有、无雨日及中雨日 的 GPS-PWV 平均值和 T 检验结果

站点	无	雨日	有ī	雨日	中雨日		
	PWV /mm	样本量 /d	PWV /mm	样本量 /d	PWV /mm	样本量 /d	T 值
乌恰	13.74	151	15.80	91	17.01	19	4.78
库车	21.16	181	25.44	57	25.85	9	9.79
和田	21.34	249	26.68	27	28.99	5	10.69
若羌	22.05	256	31.57	20	-	0	15.74

#### 4.2 最大 GPS-PWV 和降水开始时间

在降水发生前 0~1 d,库车站日均 PWV 与当月 气候平均值比值为 0.83~1.41,和田站则为 0.89~ 1.53(图 6),日均 PWV 都有不同程度的上升。降水 的开始在大多数情况下都晚于 GPS-PWV 的开始上 升。杨磊等<sup>[8]</sup>对比辽宁省 2013—2014 年主汛期GPS-PWV 值在强降水过程和日常情况下的特征发现,强 降水过程的 PWV 最大增量一般出现在强降水发生 前 1~3 h。刘晶等<sup>[15]</sup>研究表明,伊宁站 2016 年夏季降 水多在 GPS-PWV 最大值出现后 0~2 h和 5~9 h发 生,乌鲁木齐在 2015 年 2 次降水过程中强降水发生 前 4~5 h GPS-PWV 有明显增幅,且当达到峰值时 强降水开始<sup>[17]</sup>。于晓晶等<sup>[5]</sup>认为新疆天山山区2012— 2015 年夏季各站降水量与其对应 GPS-PWV 值关 联性不明显,但与其海拔高度相关性强。那么南疆西 部和昆仑山北坡的降水与其小时 GPS-PWV 值存在 怎样的关联呢?



图 6 2017—2019 年夏季库车站(a)与和田站(b)逐 日降水量、PWV 日均变化和相应各月气候平均值

将出现降雨(≥0.1 mm)且降水间隔超过6h记 为出现一次降水,将PWV最大值出现时刻与降水 开始时刻的差值记为PWV最大值相对降水开始时 间的提前量,统计4站的2017—2019年夏季降水频 次及其相对降水开始时小时最大 GPS-PWV出现的 时间提前量,详细信息如表2所示。

表 2 2017—2019 年夏季南疆地区 GPS-PWV 最大 值相对降水开始时间提前量的频次分布

站点	降水次 数/次	提前量h								
		0	1	2	3	4	5	6	7~9	
乌恰	94	42	20	9	8	7	1	1	7	
库车	61	37	10	7	3	1	1	1	3	
和田	28	4	4	4	6	4	1	1	4	
若羌	24	5	3	5	3	1	2	1	4	
合计	207	88	37	25	20	13	5	4	18	

分析最大 GPS-PWV 出现时间提前量发现,南 疆西部 2 站多数是 PWV 最大值出现时间与降水同 步发生,或是与降水发生时间间隔较短,大气水汽的 累积和释放与降水的开始有很好的对应关系<sup>[32]</sup>。乌 恰站(降水 94 次)与库车站(降水 61 次)PWV 最大 值出现时间与降水同步发生的频次各占其总降水次 数的 44.7%和 60.7%,乌恰站 PWV 最大值出现时间 超前降水发生 1、2、3 h 的数量分别为 20、9、8 次,库 车站 PWV 最大值出现时间超前降水发生 1、2 h 的 数量分别为 10、7 次。昆仑山北坡 2 站 PWV 最大值 出现时间与降水同步发生和超前降水发生时间 1、 2、3、7 h 以上的次数相对均衡,和田站各有 4~6 次, 若羌站各有 3~5 次。两区域海拔相对较高地区超前降水发生时间 5~6 h 次数相对较少(均为 1 次),海拔相对较低地区 PWV 最大值超前降水发生时间 4~6 h 次数相对较少(各 1~2 次)。另外从地区 PWV 与降水分布可知,南疆西部出现降水 155 次,其中 136 次发生在 PWV 最大值出现后 0~3 h,占总降水次数的 87.7%;昆仑山北坡共出现降水 52 次,35 次发生在 PWV 最大值出现后 0~3 h,占总降水次数的 67.3%。可见 PWV 最大值出现时间超前降水0~3 h发生频次最高,水汽在短时间内快速凝聚,这可能是与夏季南疆降水天气的水汽聚集机制常常骤然建立且持续时间短暂有关<sup>[5,20]</sup>。

测站小时 PWV 最大值对南疆西部和昆仑山北 坡地区降水开始的短时临近预报有一定指示意义。 南疆西部 PWV 最大值出现时间超前降水 0~1 h 发 生频次最高,昆仑山北坡降水主要出现在 PWV 最 大值 0~3 h 和 7~9 h,两区域海拔相对较低地区 PWV 最大值时间提前量更短。

### 5 结论

基于 2017—2019 年南疆 GPS-PWV、RS-PWV 和逐时降水资料,分析了南疆西部与昆仑山北坡的 GPS-PWV 时空变化特征,讨论夏季 2 个区域不同 高度不同量级降水过程的 GPS-PWV 逐日变化、小 时变化与实际降水的对应关系,得到如下结论:

(1)08 和 20 时南疆西部和昆仑山北坡 GPS-PWV 整体略高于 RS-PWV,南疆西部和昆仑山北坡 代表站这 2 套资料的均方根误差(RMSE)均在 2 mm 左右,具有较高的精度和相关性,确定系数均>0.92, 可以反映该地区实际大气可降水量水平。

(2)南疆西部和昆仑山北坡不同海拔站点 GPS-PWV 空间分布差异明显,大部分站点 GPS-PWV 随 海拔高度的增加而减小,南疆西部库车站和叶城站 最大,均为 12.3 mm,布伦口乡站最小为 4.4 mm;昆 仑山北坡若羌站和塔中站最大,均为 11.6 mm,于田 站最小,为 8.3 mm。

(3)各站点 GPS-PWV 逐月变化都呈单峰型,夏 季 7、8 月最大,冬季 12 月一次年 2 月最小,且夏季 各站点是秋季、春季的 2 倍左右,大部分站点是冬季 的 5 倍左右。春、夏季各站 GPS-PWV 距平日变化为 单峰型,春季高海拔地区峰值出现在 10—11 时,低 海拔地区峰值出现在 08 时,和夏季相比高海拔地区 峰值早出现 1~5 h、低海拔地区峰值晚出现 2 h;秋、 冬季 GPS-PWV 距平日变化除了乌恰站与若羌站的 秋季为单峰型外,其他均为三峰或四峰型,02时前 后、11和19时前后均出现峰值。

(4)各站点 GPS-PWV 平均值在有、无降水时均 有显著差异,昆仑山北坡差异更大。南疆西部降水发 生前 PWV 已开始上升,PWV 峰值主要出现在降水 前 0~1 h;昆仑山北坡 PWV 峰值主要出现在降水前 0~3 h 和 7~9 h; 而两区域海拔相对较低站点 PWV 峰值提前量更短,PWV 达到峰值时昆仑山北坡不易 产生降水。

南疆西部和昆仑山北坡 *CPS-PWV* 存在明显时 空差异,而一次强降水过程会导致季节内各月、日变 化和日循环特征出现较大差异,本文分析发现 2 区 域各站点 *CPS-PWV* 的最大值和降水前峰值出现的 时间提前量可作为降水开始的临近预报预警参考 值,可将此结论应用于日常预报业务中做进一步检 验和验证,但要注意考虑存在出现日均 *PWV* 峰值 但未出现降水的情况,会有一定的空报率,需结合天 气背景进行综合研判。另外,上述研究结果仅基于 2017—2019 年资料且有缺测值,今后还需利用更多 站点、更完整时间序列资料开展相关研究,结合更多 源资料剖析大气水汽增湿过程及其成因,为有效提 高临近预报预警准确率提供数据支撑。

#### 参考文献:

- [1] 杨莲梅,刘晶.新疆水汽研究若干进展[J].自然灾害学报, 2018,27(2):1-13.
- [2] 吴海英,曾明剑,张备,等.地基 GPS/PWV 在降水过程中 的突变与缓变性特征[J].气象科学,2015,44(8):1033-1041.
- [3] 李光伟,黄彦彬,敖杰,等.GPS 探测与 FY-2 反演大气可 降水量对比分析[J].气象,2018,44(8):1082-1093.
- [4] 崔丽娜,史玉光,崔彩霞,等.塔克拉玛干沙漠 2009 年大
  气水汽含量的日变化特征 [J]. 干旱气象,2010,28(4):
  407-410.
- [5] 努尔比亚·吐尼牙孜,张超,李泽巍,等.南疆西部 2016 年
  8月4次暴雨过程特征分析[J].干旱气象,2019,37(2): 301-311.
- [6] 常姝婷,刘玉芝,华珊,等.全球变暖背景下青藏高原夏季 大气中水汽含量的变化特征[J].高原气象,2019,38(4):
   227-236.
- [7] 于晓晶,唐永兰,于志翔,等.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,2019,45(12): 1691-1699.
- [8] 杨磊,蒋大凯,王瀛,等.辽宁省汛期 GPS 大气可降水量 的特征分析[J].干旱气象,2016,34(1):82-87.
- [9] 马思琪,周顺武,王烁,等.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,2016,35(2):

318-328.

- [10] 韩辉邦,张小军,张博越,等.柴达木盆地 GPS 大气可降水量精度检验及其变化特征[J].干旱气象,2020,38(1):
  50-57.
- [11] 付志康,万蓉,于胜杰,等.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,2017,37(4):553-560.
- [12] 石小龙,尚伦宇,尹远渊,等.大连地区 GPS 反演大气可 降水量的变化特征 [J]. 高原气象,2014,33 (6):1648-1653.
- [13] 杨璐瑛,刘畅,杨成芳,等.不同天气系统影响下强降雨 过程 GPS 可降水量变化特征对比 [J]. 干旱气象, 2018,36(3):475-482.
- [14] 贝纯纯,李昕,王元,等.GPS/PWV 资料在梅雨锋暴雨个 例中的同化试验[J].气象科学,2016,36(2):149-157.
- [15] 刘晶,周雅蔓,杨莲梅,等.2016年伊犁河谷大气可降水 量变化特征及其与降水的关系
   [J]. 干旱气象,2019,37
   (4):565-576.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] 黄艳,俞小鼎,陈天宇,等.南疆短时强降水概念模型及 环境参数分析[J].气象,2018,44(8):1033-1041.
- [20] 曾勇,杨莲梅.南疆西部两次短时强降水天气中尺度特征对比分析[J].暴雨灾害,2017,36(5):410-421.
- [21] 郑宁,刘琼,黄观,等.新疆三大山区可降水量时空分布 特征[J].干旱区地理,2019,42(1):77-84.
- [22] 谢泽明,周玉淑,杨莲梅.新疆降水研究进展综述[J].暴 雨灾害,2018,37(3):204-212.
- [23] 张家宝,苏起元,孙沈清,等.新疆短期天气预报指导手册[M].乌鲁木齐:新疆人民出版社,1986.
- [24] 赵克明,黄艳,于碧馨.2013 年南疆西部暴雨天气的水 汽特征[J].气象科技,2017,45(1):122-130.
- [25] 张加敏,徐华君,边英英,等.新疆南疆地区降水量的时 空变化特征[J].湖北农业科学,2016(21):5496-5499.
- [26] 杨霞,周鸿奎,赵克明,等.1991-2018 年新疆夏季小时 极端强降水特征[J].高原气象.2020,39(4):762-773.
- [27] 张云惠,李海燕,蔺喜禄,等.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,2015,41(7): 816-824.
- [28] 杨霞,周鸿奎,赵克明,等.塔里木东风低空急流特征分析[J].干旱区研究,2021,38(5):1216-1225.
- [29] 史玉光.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,2014.
- [30] 魏凤英.现代气候统计诊断与预测技术[M].北京:气象

出版社,2007.

[31] 张俊,李如琦,李桉孝,等.1970-2019年夏季南疆低空 垂直速度与降水量时空变化特征[J].沙漠与绿洲气象, 2021,15(5):71-77.

[32] 李国平,黄丁发,刘碧全.地基 GPS 遥感的成都地区夏

季可降水量的日循环合成分析[J].水科学进展,2006,17 (2):160-163.

[33] 魏晓雯,梁萍,何金海.上海地区不同类型短时强降水的 大尺度环流背景特征分析[J].气象与环境科学,2016,39 (2):69-75.

# Variation Characteristics of GPS Precipitable Water Vapor over the West of Southern Xinjiang and the Northern Slope of Kunlun Mountains During 2017–2019

YU Bixin<sup>1</sup>, LIU Jing<sup>2,3</sup>, AN Dawei<sup>1</sup>, ZHANG Yunhui<sup>1</sup>

(1.Xinjiang Meteorological Observatory, Urumqi 830002, China;

2. Institute of Desert Meteorology, China Meteorological Administration, Urumqi 830002, China;

3.Center for Central Asia Atmosphere Science Research, Urumqi 830002, China)

Abstract Based on the ground-based GPS Precipitable Water Vapor (hereinafter referred to as "GPS-PWV"), Precipitable Water Vapor calculated by conventional sounding water vapor profile (hereinafter referred to as "RS-PWV") and hourly precipitation data over southern Xinjiang from 2017 to 2019, the spatial and temporal variation characteristics of GPS-PWV over the west of southern Xinjiang and the northern slope of Kunlun Mountains; and the correspondence between the variation of GPS-PWV under the different altitudes and precipitation levels are statistically analyzed. The results show that GPS-PWV and RS-PWV have a high correlation over the west of southern Xinjiang and the northern slope of Kunlun Mountains as expected. The spatial distribution of GPS-PWV at different altitudes is significantly different, and GPS - PWV at most observation sites decreases with altitude increased .The monthly changes of GPS-PWV at each observation site are unimodal, with the smallest in December or January (winter), and the largest in July and August (summer). The GPS-PWV anomalies at each site are unimodal in spring and summer, while they are all three-peak or four-peak in autumn and winter, except for the single-peak type at Wuqia and Ruoqiang station in autumn. There is a significant difference in the average PWV between with and without precipitation at each site, and the difference is greater on the northern slope of Kunlun Mountains. The PWV has begun to rise before the precipitation, the peak of the PWV mainly occurs within 0-1 h before the precipitation over the west of southern Xinjiang, and the peak PWV occurs 0~3 h and 7-9 h before the precipitation over the northern slope of Kunlun Mountains.

Key words precipitable water vapor (PWV); ground-based GPS; the west of southern Xinjiang; the northern Slope of Kunlun Mountains; spatiotemporal characteristics