刘晶,杨莲梅,李俊江,等.2024.中昆仑山北坡水汽含量的计算及特征分析[J].暴雨灾害,43(2):224-233. LIU Jing, YANG Lianmei, LI Junjiang, et al. 2024. Calculation and characteristic analysis of water vapor content in the north slope of the Middle Kunlun Mountains [J]. Torrential Rain and Disasters, 43(2):224-233 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2023-053

中昆仑山北坡水汽含量的计算及其特征分析

刘晶[1,2,3],杨莲梅[1,2,3],李俊江[4],郭玉琳[5],李阿桥[4]

(1. 中国气象局乌鲁木齐沙漠气象研究所,乌鲁木齐 830002;2. 新疆云降水物理与云水资源开发实验室,乌鲁木齐 830002;3. 西天山云降水物理野外科学观测基地,乌鲁木齐 830002;4. 新疆气象信息中心,乌鲁木齐 830002;5. 新疆维吾尔自治区气候中心,乌鲁木齐 830002)

摘　要:干旱区水汽变化影响区域水资源系统的结构和演变,基于2020年1月—2022年12月中昆仑山北坡地区4个地基GPS遥感大气可降水量资料(GPS-PWV)、2个探空站观测资料和108个地面气象观测站逐时水汽压资料,利用一元线性拟合方法建立了适用于中昆仑山北坡地区的大气水汽含量(W-PWV)和地面水汽压计算模型(*W-e*)并对计算结果进行评估,分析了中昆仑山北坡地区东段、中段、西段W-PWV的时空分布特征及降水开始时刻与W-PWV峰值的关系。结果表明:(1) W-PWV年平均高值区位于研究区西段,中段次之,东段沙漠南缘W-PWV最低。海拔高度大于1 500 m测站W-PWV随高度升高逐渐减少。夏季地面气象观测站平均W-PWV是春、秋季的2倍左右;(2) 研究区W-PWV月变化具有单峰型特征,其中海拔高度1 300~1 500 m测站的W-PWV在7月和8月达到峰值,其余测站的W-PWV在8月达到峰值,海拔低于2 000 m和高于2 000 m测站W-PWV分别在夜间和白天维持较高值;(3) 水汽含量模型计算的测站W-PWV与降水开始时刻有较好的对应关系,降水前各站W-PWV均存在不同程度跃变过程,降水过程前1~2 h内W-PWV峰值达到测站W-PWV月平均值的1.5倍以上。

关键词:中昆仑山北坡;水汽含量;地基GPS;水汽含量计算模型

中图分类号:P426.1　　**文献标志码:** A　　**DOI:** 10.12406/byzh.2023-053

Calculation and characteristic analysis of water vapor content in the north slope of the Middle Kunlun Mountains

LIU Jing[1,2,3], YANG Lianmei[1,2,3], LI Junjiang[4], GUO Yuling[5], LI Aqiao[4]

(1. *Institute of Desert Meteorology, China Meteorological Administration, Urumqi* 830002; 2. *Xinjiang Cloud Precipitation Physics and Cloud Water Resources Development Laboratory, Urumqi 830002; 3. Field Scientific Observation Base of Cloud Precipitation Physics in West Tianshan Mountains, Urumqi 830002; 4. Xinjiang Meteorological Information Center, Urumqi* 830002; 5. *Xinjiang Climate center, Urumqi* 830002)

Abstract: The water vapor changes in arid areas could affect the structure and evolution of water resource systems in their surrounding areas. Based on the precipitable atmospheric water vapor (GPS-PWV) of 4 ground-based GPS stations, the observation data of 2 sounding stations and the hourly surface pressure water vapor data of 108 meteorological observation stations on the north slope of the Middle Kunlun Mountains from January 2020 to December 2022, this study established the atmospheric water vapor content and surface water vapor pressure (*W-e*) model suitable for the north slope of the Middle Kunlun Mountains using the unary linear fitting method. The results of water vapor content calculated by this model were verified. Then we analyzed the distribution characteristics of atmospheric water vapor content in the western section, the middle section, and the eastern section of the study area, as well as the relationship between the beginning time of precipitation and the W-PWV peak value. The results show that: (1) The annual mean W-PWV is largest in the western section of the study

收稿日期: 2023-03-17;**定稿日期:**2023-12-28

资助项目: 新疆气象局引导性计划项目(YD202301);新疆维吾尔自治区自然科学基金项目(2023D01B06);"天山英才"培养计划项目(2022TSYCLJ0003);新疆维吾尔自治区自然科学基金项目(2022D01D86);新疆金锋华云发展基金项目(Hyj202307)

第一作者: 刘晶,主要从事干旱区云水资源研究。E-mail:994365768@qq.com

通信作者: 杨莲梅,主要从事干旱区云微物理特征研究。E-mail: yanglm@idm.cn

© Editorial Office of *Torrential Rain and Disasters*. OA under CC BY-NC-ND 4.0

area, followed by the middle section, and the smallest in the eastern section which located in the southern edge of the desert. The W-PWV of the stations with altitude greater than 1 500 m gradually decrease with altitude increasing. The average W-PWV of each meteorological observation station in summer is about twice than that in spring and autumn. (2) The monthly variation of W-PWV shows a unimodal distribution characteristic. The W-PWV of the stations with an altitude higher than 1 300 m but lower than 1 500 m reached its peak in July and August, while that of the other stations reached its peak in August. The W-PWV of stations with an altitude below 2 000 m and above 2 000 m maintained a high value at night and during the day, respectively, which may be related to the thermal difference between mountain and basin from daytime to nighttime. (3) There is a good correspondence between the W-PWV calculated by *W-e* model and the beginning time of precipitation. Before precipitation, the W-PWV of each station is jumped varying degrees, and the peak value of W-PWV within 1-2 h before the precipitation is more than 1.5 times of the monthly average value of W-PWV .

Key words: north slope of the Middle Kunlun Mountains; water vapor content; ground-based GPS; the calculation model of water vapor content

引 言

大气中的水汽含量是全球能量和水分循环的重要环节,其时空分布及其相变所产生的潜热,对天气系统演变、大气能量转换和区域水分平衡具有重要作用(李国平和黄丁发,2004)。在实际工作中,通常用可降水量(Precipitable Water Vapor,PWV)来表示单位截面大气柱中的水汽含量。目前常用的计算大气水汽含量的方法主要有探空资料比湿分层积分法、GPS数据求解法、地面经验关系式和再分析资料计算等方法,各种方法各有优劣势(陈宏等,2014)。探空资料比湿分层积分法的结果从理论上更可靠,常用来判断其他估算结果的准确性,但探空站点较稀疏,且时间分辨率低(Chen and Bradley,2006)。GPS数据求解法应用GPS技术遥感大气水汽总量,可以得到时间分辨率更高的大气水汽含量,但部分区域开展相关水汽观测试验时间短,且布设站点少(于晓晶等,2019)。再分析资料计算法的数据空间分辨率和时间分辨率相对探空站较高(Zhang et al.,2019),但在干旱地区海拔较高区域的适用性未经检验,估算结果准确性常受到质疑。地面经验关系式法充分利用了地面气象数据,计算简单且结果较好,不足是计算结果存在一定误差(向华等,2007;杨青等,2008)。

中昆仑山北坡位于新疆塔克拉玛干沙漠与昆仑山中段交界地带,北临塔里木盆地,南接青藏高原,西起乌鲁克河(新疆叶城县与皮山县界河),东至安迪尔河(新疆民丰县与且末县界河),拥有高山、戈壁、沙漠、绿洲等陡峭地形和复杂下垫面,是典型的内陆干旱区。作为大气降水和空中水循环的重要物质基础,中昆仑山北坡地区水汽的变化不仅影响着周边区域水资源系统的结构和演变,还会影响到干旱地区经济发展和人民生产生活。在中昆仑山北坡水汽含量的研究中,一些学者使用了不同的资料和方法。刘蕊等(2010)对比了再分析资料和经验关系式计算的新疆地区大气水汽含量,结果表明用NCEP再分析资料计算的多年平均大气水汽含量低于用经验公式计算的;杨青等(2008)建立了逐月水汽含量与地面水汽压的关系式,并指出塔里木盆地水汽高值区分别位于盆地西部和北部边缘地带,而塔中站是盆地水汽量最少的,而王凯等(2018)利用再分析资料研究认为塔里木盆地水汽含量主要集中在盆地东部一带;崔丽娜等(2010)利用塔中站2009年1—10月地基GPS观测的大气水汽含量数据分析了不同季节的日变化特征,指出该站全年7月水汽含量最大,1月最小,其日变化幅度10月最大。

中昆仑山北坡2018年开始开展GPS水汽观测试验,但布设仪器数量较少,无法涵盖中昆仑山北坡不同海拔高度站点,且高时空分辨率再分析资料的大气水汽含量产品在中昆仑山北坡地区适用性没有得到验证,因而本文利用2020年1月—2022年12月中昆仑山北坡地基GPS-PWV资料、地面气象观测站逐小时水汽压和逐小时降水量观测资料,建立适用于中昆仑山北坡地区的大气水汽含量和地面水汽压(*W-e*)模型并对结果进行验证,分析中昆仑山北坡地区大气水汽含量时空分布特征,针对有降水(小时降水量≥0.1 mm)和无降水时次开展水汽含量日变化和降水的关系研究,探寻有、无降水条件下大气水汽日变化规律,以2020年5月6日—5月7日中昆仑山北坡典型暴雨天气过程为例,对比不同方法计算的大气水汽含量峰值与降水开始时刻的关系,为揭示区域水分循环过程、合理开发中昆仑山北坡空中水资源提供参考。

1 资料和方法

1.1 资料介绍

本文使用的资料包括2020年1月—2022年12月中昆仑山北坡地区和田站、民丰站、且末站和于田皮什盖村站的地基GPS大气水汽探测仪的大气可降水量资料(GPS-PWV),利用GAMIT软件(赵玲等,2006)处理反演得到。剔除异常数据,定义日大气可降水量反

演时次超过12 h (即观测小时数超过日观测总小时数50%)为一个有效观测日，且各站每年有效观测日超过年总观测日60%，最终获得4站共3 756个有效观测日数据。水汽压数据选用2020年1月—2022年12月中昆仑山北坡地面气象观测站逐小时水汽压和降水量观测数据，满足每年逐小时水汽压和降水量观测小时数超过年观测总小时数60%条件的站点共108站，资料清单如表1。

文中选用中昆仑山北坡和田和民丰探空观测站2020年1月—2022年12月每日08时和20时(北京时，下同)计算得到的大气可降水量资料(表1)对测站地基GPS-PWV精度进行验证，探空大气可降水量(RS-PWV)数据由美国怀俄明大学(University of Wyoming, UW)基于民丰和和田站(与地基GPS站同址)探空观测资料计算得到(http://weather.uwyo.edu)。文中将全年划分为春(3—5月)、夏(6—8月)、秋(9—11月)、冬(12月—翌年2月)四季。另外，为了分析中昆仑山北坡地区水汽含量时空变化特征，将研究区进一步划分为西段、中段和东段(图1)。

表1 资料信息列表

Table 1 Research data information list

序号	资料类型	站别	站数	起止时间	时间分辨率
1	GPS-PWV	地基GPS观测站	4	2020年1月—2022年12月	1 h
2	RS-PWV	气象探空站	2	2020年1月—2022年12月	12 h
3	地面水汽压	国家和区域气象观测站	108	2020年1月—2022年12月	1 h
4	降水量	国家和区域气象观测站	108	2020年1月—2022年12月	1 h

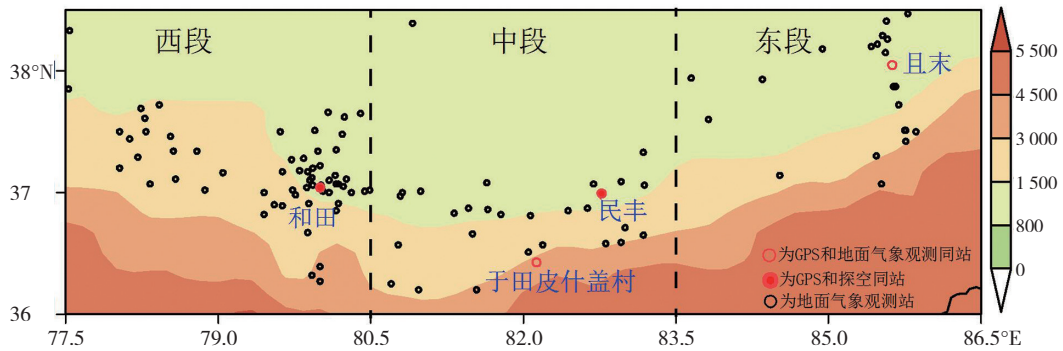

图1 中昆仑山北坡不同分区的地基GPS测站、地面气象观测站、探空站及地形高度(填色，单位：m)分布图

Fig.1 Distribution of ground-based GPS stations, meteorological observation stations, radiosonde stations and topographic height (color-filled, unit: m) on the different area of the north slope of the Middle Kunlun Mountains

1.2 验证方法

以和田站和民丰站作为代表站，计算两站2020—2022年每日08时和20时RS-PWV和GPS-PWV的平均偏差B_{ias}、平均绝对偏差C_s、拟合优度R^2、均方根误差s，进而验证GPS-PWV精确性。计算公式如下

$$s=\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(y_i-x_i)^2} \tag{1}$$

$$C_s=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left|(y_i-x_i)\right| \tag{2}$$

$$B_{ias}=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(x_i-\bar{x}) \tag{3}$$

$$R^2(x,y)=\frac{\mathrm{cov}(x,y)}{\sigma_x\sigma_y} \tag{4}$$

式(1)-(4)中x_i为GPS-PWV，$\bar{x}$为探空站计算得到的大气水汽含量平均值，y_i为RS-PWV。σ_x和σ_y分别为GPS-PWV和RS-PWV的标准偏差。

1.3 水汽含量-水汽压计算模型

根据前期的研究结果和实际物理意义(张学文，2004；杨青等，2008)，利用地面水汽压e计算大气水汽含量W的公式定义为：$W=a+b\times e$，其中a和b为待定系数。由于到当地面水汽压为0时大气水汽含量也应为0，因而上述公式定义可简化为一元线性模型：$W=b\times e$。

已有的研究大多利用08时和20时的探空站计算的大气水汽含量和地面水汽压建立相应的模型(姚俊强等，2012)，为了能够综合利用地基GPS高时间分辨率和地面气象观测站高空间分辨率，通过分析和田站、民丰、于田县皮什盖村和且末站4个测站(地基GPS测站与地面气象观测站同址，简称4个测站)地基GPS-PWV与地面水汽压散点图(图2)发现，0~15 hPa间水汽压较为密集的分布在拟合线附近，15~25 hPa间水汽压与大气水汽含量分散在拟合线上下，拟合曲线能够较好地代表水汽压与地基GPS水汽含量间的关系，拟合优度R^2达0.83，大气水汽含量W与地面水汽压e存在较好的线性关系，基于一元线性回归拟合分析方法，得到了两者的关系式

$$W=1.86\times e \tag{2}$$

式(2)利用地面站观测的地面水汽压计算可得大气水汽含量 W(下文称为W-PWV)。

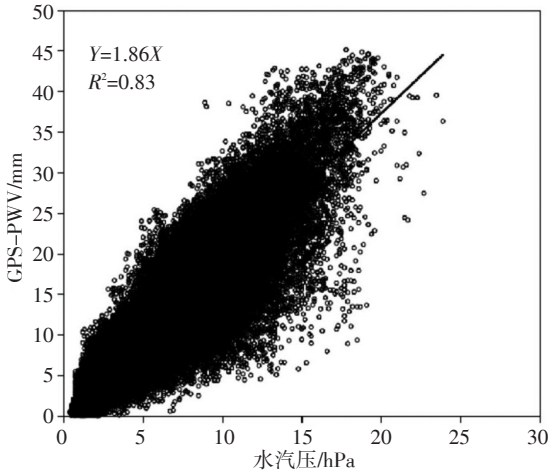

图2 2020年1月—2022年12月中昆仑山北坡4个测站地面水汽压与GPS-PWV散点图

Fig.2 The scatter plots of GPS-PWV and water vapor pressure at four stations on the north slope of the Middle Kunlun Mountains from January 2020 to December 2022

1.4 水汽含量与降水演变分析方法

已有的研究表明，降水量与大气水汽总量激增有较好关系(Benevides et al.，2015)，水汽含量跃变过程与降水发生和结束有较好的关系，且受大尺度水汽输送的影响，测站降水期间和降水后GPS-PWV仍维持较高值，空气中水汽含量高(刘晶等，2018)，降水前后6 h测站GPS-PWV变化较为剧烈，因而本文中定义降水前后6 h为有降水影响时次，其余时次为无降水影响时次，计算有降水时次和无降水时次GPS-PWV、W-PWV的平均值，进而分析有、无降水情况下大气水汽含量日变化的差异。

2 水汽含量-水汽压模型结果评估

通过分析2020—2022年和田站和民丰站RS-PWV和GPS-PWV(匹配样本数分别为1 977和1 682个)，两站平均偏差(B_{ias})绝对值均小于1 mm (图3)，其中民丰站平均偏差仅0.13 mm，说明了沙漠地区GPS-PWV具有较高的准确性。此外和田和民丰站拟合优度 R^2 分别为0.97、0.96，两站均方根误差(s)分别为8.73和7.56 mm，平均绝对偏差(C_s)分别为7.09和6.07 mm，线性回归结果显示，各站截距均为正值，以上分析结果说明，和田站和民丰站RS-PWV和GPS-PWV具有较好的一致性，GPS-PWV结果有较高的精度，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、空间密度上的不足。

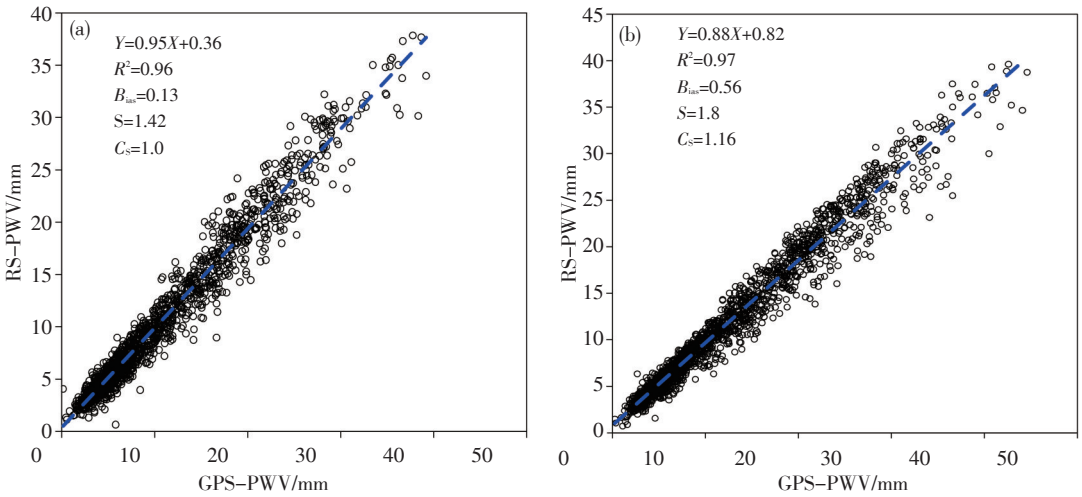

图3 2020年—2022年08时和20时民丰站(a)和和田站(b)GPS-PWV和RS-PWV散点分布图(蓝色短虚线代表线性回归拟合线)

Fig3 The scatter plots of GPS-PWV and RS-PWV at (a) Minfeng station and (b) Hetian station at 08:00 BT and 20:00 BT from 2020 to 2022. (The short blue dashed line represents the linear regression fitting line)

利用2020年1月—2022年12月08时和20时数据计算得到RS-PWV，对比和田和民丰站经验公式(2)计算得到水汽含量W-PWV和探空数据得到的水汽含量RS-PWV(表2)，发现两种方法计算得到的水汽含量值相差较小，两者存在较好的对应关系，和田站和民丰站两种方法计算的大气水汽含量的相关系数分别为0.94和0.90，说明经验公式(2)计算得到的W-PWV与探空计算得到RS-PWV具有良好的对应关系。两站不同方法计算的大气水汽含量平均偏差分别为-0.31mm和0.04 mm，均方根误差分别为2.61 mm和3.41 mm，由此可见利用地基GPS-PWV和地面水汽压数据建立的 W-e 模型计算结果与探空资料计算的结果差别较小，且计算简单，物理意义明确，可用于研究区其他无地基GPS水汽探测仪站点的水汽计算。

为进一步验证 W-e 模型在中昆仑山北坡的可用性，利用不同方法计算得到中昆仑山北坡平均水汽含

表2 2020年1月—2022年12月08时和20时中昆仑山北坡W-PWV与RS-PWV的评估结果对比

Table.2 The comparison of assessment results between W-PWV and RS-PWV on the north slope of the Middle Kunlun Mountains at 08:00 BT and 20:00 BT from January 2020 to December 2022

站点	相关系数	平均偏差/mm	均方根误差/mm
和田站	0.94	-0.31	2.61
民丰站	0.9	0.04	3.41

量的时序分布情况(图4),其中GPS-PWV平均为4个测站GPS大气水汽含量的平均值,W-PWV平均为108个地面站经验公式计算结果的平均值,对比发现,两种方法计算的大气水汽含量拟合优度R^2达0.94,地基GPS-PWV和地面经验公式计算W-PWV结果较为相似,均在4月前缓慢增长,5—8月快速增长,9月后迅速下降,随后维持在较低水平,这与上文分析结果较为一致。

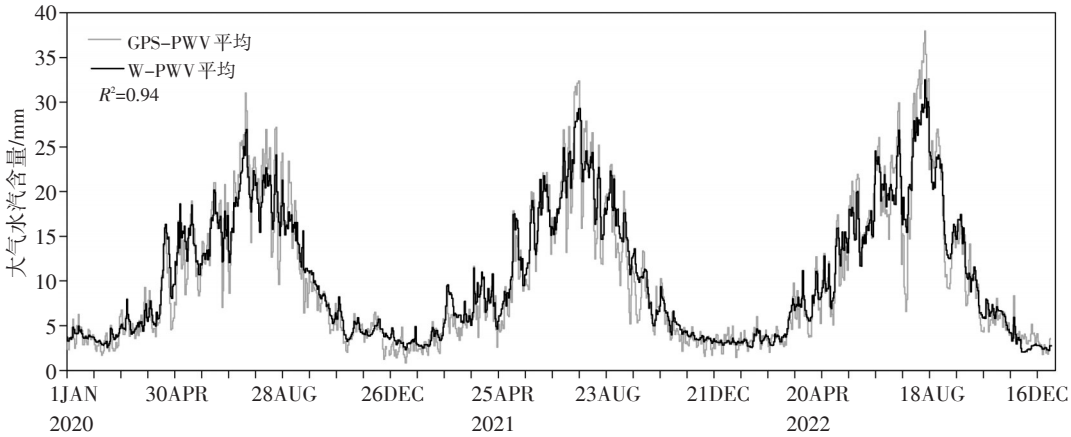

图4 2020年1月—2022年12月中昆仑山北坡GPS-PWV和W-PWV时序图

Fig.4 Temporal variation of GPS-PWV and W-PWV on the north slope of the Middle Kunlun Mountains from January 2020 to December 2022

3 结果与分析

上节的验证结果表明,中昆仑山北坡地区采用*W-e*模型计算的大气水汽含量W-PWV和地基GPS反演的大气水汽含量GPS-PWV、探空站计算的大气水汽含量RS-PWV均具有较好的相关性,W-PWV可代表研究区其他无地基GPS水汽探测仪站点的大气水汽含量。本节研究W-PWV的时空分布特征及不同海拔高度测站W-PWV的月分布和日变化差异,并探讨了强降水过程期间W-PWV演变与降水开始时刻的关系。

3.1 W-PWV时空分布特征

分析*W-e*模型计算得到的中昆仑山北坡地区大气水汽含量W-PWV年平均分布(图5a)发现,研究区W-PWV年平均高值区位于皮山县—和田附近(研究区西段),海拔小于1 500 m测站W-PWV在7.83~17.14 mm;研究区中段W-PWV次之,海拔小于1 500 m测站W-PWV在6.38~12.7 mm;研究区东段沙漠南缘最少,这与上文分析的研究区测站GPS-PWV分布情况较为一致。结合测站年平均W-PWV与海拔高度分布(图5b)分析发现,研究区海拔大于1 500 m测站W-PWV随海拔高度逐渐减少,海拔小于1 500 m且81°E以东测站年平均W-PWV随经度增大逐渐减小(图5c),海拔小于1 500 m,79.5°—80.5°E范围测站年平均W-PWV分布较为分散,这与研究区年平均W-PWV空间分布情况较为一致。

从W-PWV季节分布(图6)来看,研究区春季与秋季各站平均W-PWV相当(图6a、c),夏季最大(图6b),冬季最小,且各站W-PWV数值接近(图6d),夏季各站平均W-PWV是春、秋季的2倍左右,这与季风区大气水汽含量季节分布有较大差异。研究区西段一年四季均处于W-PWV大值区,各季节测站最大W-PWV与最小W-PWV相差近1倍,最大和最小W-PWV出现的测站海拔高度相差超1 500 m以上;研究区中段海拔小于1 500 m测站各季节W-PWV较西段明显减小,测站W-PWV随海拔高度增加逐渐减小。研究区东段海拔小于1 500 m测站均位于塔克拉玛干沙漠南缘,W-PWV较西段和东段较小,夏季各站W-PWV随高度逐渐减小,其他季节测站W-PWV随高度变化不大。

中昆仑山北坡地区W-PWV月分布呈现单峰分布特征(图7a),1—7月W-PWV逐渐增长,8—12月W-PWV逐月下降,最大月(7月)和最小月(1月)W-PWV相差18.8 mm,W-PWV季节变化较天山山区(姚俊强等,2012)更加剧烈。通过分析W-PWV月变化率发现,中昆仑山北坡地区W-PWV 2—7月是增长期,5月增长率最大,达62.48%,8月增长率最小,为

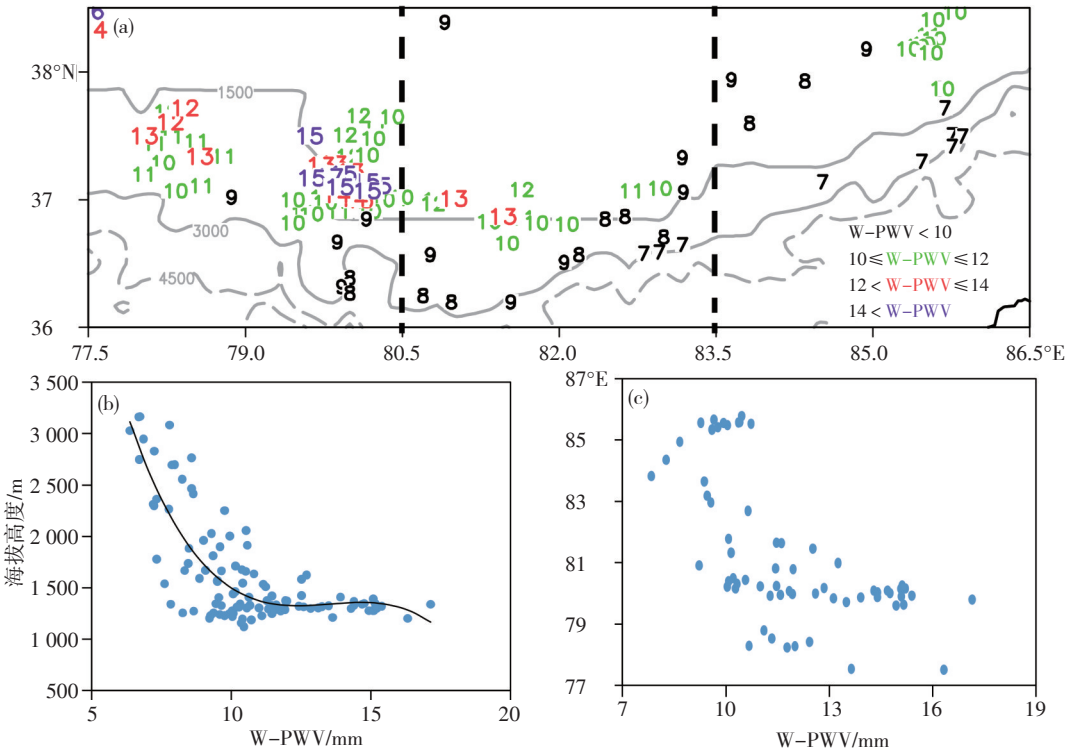

图5 2020年1月—2022年12月中昆仑山北坡地面气象观测站年平均W-PWV空间分布(a，灰色实线代表海拔高度1 500 m和3 000 m，灰色虚线代表海拔高度4 500 m)，不同海拔高度测站的年平均W-PWV分布(b)与海拔高度小于1 500 m的不同经度测站年平均W-PWV分布(c)图

Fig.5 (a) Spatial distribution of the annual average W-PWV (the gray solid lines in the figure represent the topographic altitude of 1 500 m and 3 000 m, the gray dashed line represents the topographic altitude of 4 500 m), (b) the distribution of annual average W-PWV at stations of different altitude and (c) the distribution of annual average W-PWV of the stations with an altitude less than 1 500 m at different longitude on the north slope of the Middle Kunlun Mountains from January 2020 to December 2022

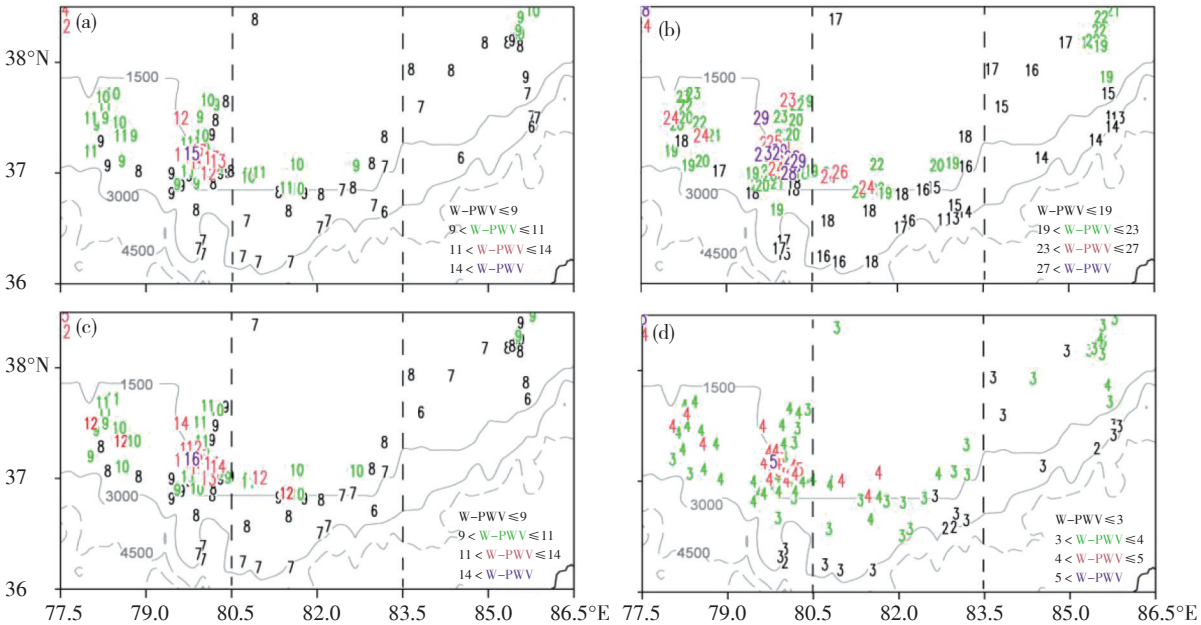

图6 *W-e*模型计算的2020年1月—2022年12月中昆仑山北坡春季(a)、夏季(b)、秋季(c)和冬季(d)平均水汽含量W-PWV(彩色数字，单位：mm)和海拔高度(灰色等值线，线条表示的高度同图5a)空间分布

Fig.6 The distribution of average W-PWV (the color number, unit: mm) calculated by the *W-e* model in (a) spring,(b) summer,(c) autumn, and (d) winter and the topographic altitude (the gray solid line, the altitude indicated by the lines is same as Fig.5a) on the north slope of the Middle Kunlun Mountains from January 2020 to December 2022

2.98%，9月—次年1月W-PWV逐渐减小。由此可见，中昆仑山北坡W-PWV春季增长最快，秋季减小最快，而冬季W-PWV变化不明显。此外，对比不同海拔高度测站W-PWV月分布(图7b)发现，各月份海拔高度1 300～1 500 m的W-PWV均高于其余海拔高度测站W-PWV，海拔高度1 300～1 500 m测站的W-PWV在7月和8月达到峰值，而海拔低于1 300 m测站和海拔高于1 500 m测站的W-PWV在8月达到峰值。

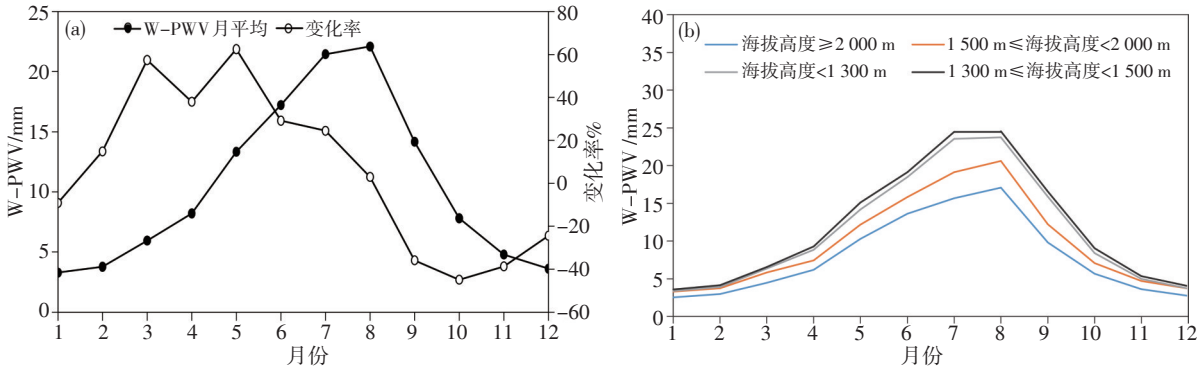

图7 中昆仑山北坡*W-e*模型计算的W-PWV月平均和月平均变化率演变(a)及不同海拔高度测站的月平均W-PWV演变(b)

Fig.7 (a) The variation of monthly average and monthly average change rate of W-PWV, (b) the variation of monthly average W-PWV calculated by *W-e* model at stations at different altitudes on the north slope of the Middle Kunlun Mountains

中昆仑山北坡测站海拔高度差异大，最低和最高测站海拔高度相差2 045 m。由于中昆仑山北坡北临塔克拉玛干沙漠，南接青藏高原，因而日间和夜间近地面热力差异较大，局地山盆环流下大气水汽含量日变化也有差异。通过分析研究区基于*W-e*模型计算的不同海拔高度测站平均W-PWV日距平(ΔPWV)发现(图8)，海拔低于2 000 m测站ΔPWV均在夜间维持较高值，白天ΔPWV逐渐下降，并在17时前后达到谷值，且海拔1 500~2 000 m测站ΔPWV日峰值出现时间略晚于海拔1 300~1 500 m测站约1 h，这可能是由于局地山盆环流造成夜间在浅山区附近有水汽辐合，因而ΔPWV在夜间维持较高值。研究区海拔高于2 000 m测站ΔPWV日间维持较高值，夜间逐渐减小，这可能是由于白天太阳辐射升温，同一高度上，在高海拔测站上空气块与低海拔测站上空气块形成温度差，并在高海拔测站上空形成气流辐合，出现ΔPWV高值区。

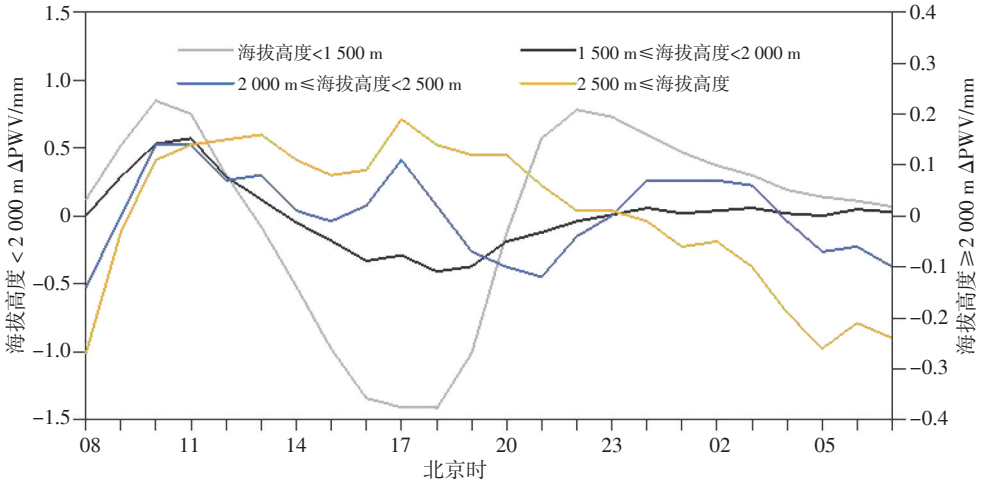

图8 2020年1月—2022年12月*W-e*模型计算的不同海拔高度测站平均W-PWV距平(ΔPWV)日变化

Fig.8 Diurnal variation of anomaly (ΔPWV) of average W-PWV calculated by *W-e* model at different altitudes from January 2020 to December 2022

综合上述分析发现，中昆仑山北坡夏季各站平均W-PWV是春、秋季的2倍左右，其中研究区东段测站春季、秋季和冬季平均W-PWV随高度变化不大，而东段测站夏季、中段和西段测站各季节平均W-PWV随高度逐渐减小。研究区W-PWV春季增长最大，秋季减小最大，而冬季W-PWV变化不明显。海拔高度1 300~1 500 m测站的W-PWV在7月和8月达到峰值，其余测站在8月达到峰值，海拔高度1 300~1 500 m测站1—12月W-PWV均高于其他测站。海拔低于2 000 m和高于2 000 m测站ΔPWV分别在夜间和日间维持较高值，且海拔1 500~2 000 m测站ΔPWV日峰值出现时间略晚于海拔1 300~1 500 m测站约1 h。

3.2 水汽含量变化与降水的演变关系

通过对比有降水和无降水影响期间水汽含量日变化(图9)发现，有降水影响期间GPS-PWV与4个同站测站平均W-PWV日变化较为一致(图9a)，4个测站平均W-PWV分别在11时、20时和04时前后出现峰值，14—15时出现谷值。此外，降水前后108个国家和区域自动气象观测站(简称“所有测站”)平均W-PWV日变化也呈现多峰值分布特征，其日变化趋势与GPS-PWV及4个测站平均W-PWV变化趋势基本一致，但峰值和谷值出现时间较GPS-PWV滞后3~4 h，这可能是由于研究区所有测站的经度跨度9°，各个测站受西风带天气系统影响的时间有所不同，因而所有测站平均W-PWV峰值和谷值出现时间较GPS-PWV晚。GPS-PWV在有无降水时的日变化形态基本相似，均在17时前后达到峰值。无降水影响期间，所有测站与4个测站平均W-PWV日变化基本一致(图9b)，W-PWV分别在11时和23时前后出现峰值(10.96 mm)，17时出现谷值(8.37 mm)，这可能与研究区17时左右平均气温达日峰值，地表植被稀疏，加之午后对流活动旺盛，地面附近的水汽经蒸发和对流运动被携带至上层大气有关(刘以林，1996；苗运玲等，2013)。

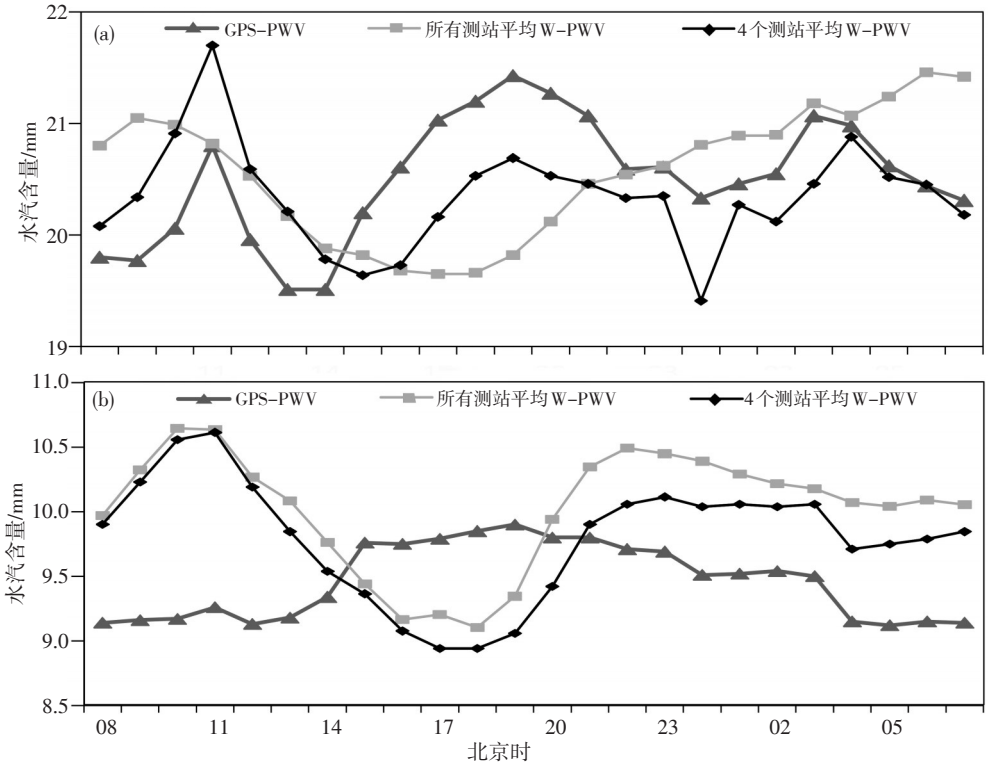

图9 2020年1月—2022年12月中昆仑山北坡有降水日(a)和无降水日(b)地基GPS-PWV、4个测站平均W-PWV、所有测站平均W-PWV日变化

Fig.9 Diurnal variation of GPS-PWV, W-PWV calculated by four stations and by all stations under the influence of (a) precipitation and (b) non-precipitation on the north slope of the Middle Kunlun Mountains from January 2020 to December 2022

2020年5月6—8日中昆仑山北坡出现暴雨天气过程，通过分析GPS观测、*W-e*水汽含量模型计算的水汽含量和降水量演变图(图10)发现，降水前(5日20时—6日16时)于田县皮什盖村站GPS-PWV和*W-e*水汽含量模型计算的W-PWV均持续增湿(图10a)，期间测站出现少量降水。6日22时—7日23时，于田县皮什盖村站W-PWV再次出现波动增长，6日22时W-PWV峰值达16.9 mm，为5月该站W-PWV平均值(9.5 mm)的1.8倍，前期测站上空持续增湿为6日23时—7日17时持续性降水提供充沛的水汽供应。5日23时—6日18时策勒站地面计算的W-PWV也呈现波动增长趋势(图10b)，增湿时间达20 h，6日17时—18时W-PWV增幅达3.9 mm，且18时W-PWV峰值达22.5 mm，为5月策勒站W-PWV平均值(14.5 mm)的1.5倍，随后测站出现短时强降水天气，最大小时雨强19.9 mm·h^{-1}。降水前测站W-PWV均存在不同程度的跃变，降水前1~2 h W-PWV均达到峰值，峰值达5月各测站W-PWV平均值的1.5倍以上，这与已有的研究结果较为一致(刘晶等，2023)，降水前W-PWV峰值除月平均值得到的倍数与降水开始时刻存在一定联系，能够为强降水天气预报预警提供一定的参考依据。

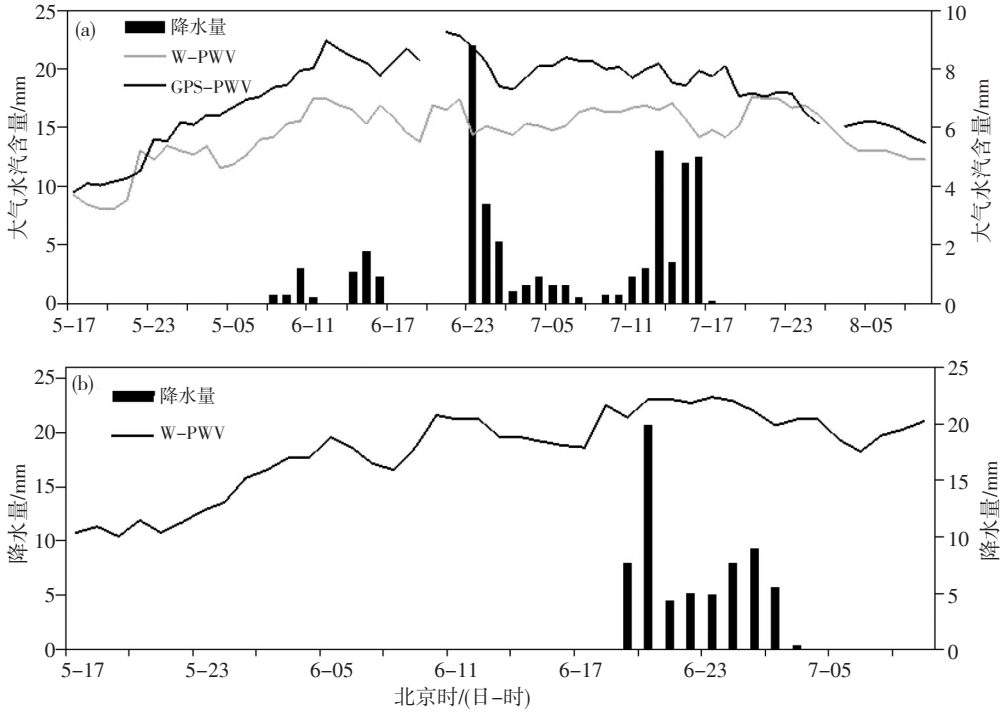

图10 2020年5月5日—7日于田县皮什盖村站地基GPS-PWV、W-PWV和小时降水量演变图(a)以及策勒站W-PWV和小时降水量演变图(b)

Fig.10 (a) Evolution of GPS-PWV, W-PWV and hourly precipitation from 5 to 7 May, 2020 at Pishegai Village station in Yutian county, (b) Evolution of W-PWV and hourly precipitation from 5 to 7 May, 2020 at Cele Station

4 结论与讨论

本文利用2020年1月—2022年12月中昆仑山北坡地区地基GPS-PWV和国家地面观测站水汽压数据建立了大气水汽含量和地面水汽压(*W-e*)模型，利用*W-e*模型的计算结果，分析了中昆仑山北坡地区大气水汽含量(W-PWV)年、季空间分布及月、日的时间演变特征，并研究了有、无降水条件下W-PWV日变化规律，对比了典型暴雨天气过程中不同方法计算的W-PWV与降水开始时刻的关系，并得到以下结论：

(1) 探空站计算RS-PWV与*W-e*模型计算的W-PWV存在较好的对应关系。*W-e*模型计算简单，物理意义明确，计算结果能够弥补中昆仑山北坡GPS仪器布设较少的不足。

(2) *W-e*模型计算的年平均W-PWV高值区位于中昆仑山北坡地区西段，中段次之，东段沙漠南缘最少。海拔大于1 500 m测站W-PWV随海拔高度逐渐减少。夏季各站平均W-PWV是春、秋季的2倍左右，西段各季节最大W-PWV与最小W-PWV相差近1倍。东段夏季测站W-PWV随高度逐渐减小。

(3)中昆仑山北坡地区W-PWV月变化呈现单峰分布特征，其中海拔高度1 300~1 500 m测站的W-PWV在7月和8月达到峰值，其余测站的W-PWV在8月达到峰值，W-PWV春季月份增长最大，秋季月份减小最大。研究区海拔低于2 000 m和高于2 000 m测站W-PWV分别在夜间和白天维持较高值。

(4)W-PWV与降水开始时刻有较好的对应关系，降水前各站经验公式计算的W-PWV均存在不同程度跃变过程，降水过程前1~2 h内W-PWV峰值达到测站W-PWV月平均值的1.5倍以上，*W-e*模型计算结果能够为强降水天气预报预警提供一定的参考依据。

*W-e*模型计算简单，时间分辨率高，基于计算结果发现中昆仑山北坡地区大气水汽含量W-PWV不同时间尺度变化特征与测站海拔高度存在一定联系，这与已有的研究结论较为一致(姚俊强等，2012)。研究中也发现了非降水时次地基GPS-PWV和*W-e*模型计算的W-PWV日变化特征存在一定差异，在山盆热力差异驱动下，中昆仑山北坡地区局地环流日变化明显，局地山盆环流日变化与大气水汽含量日变化间有何联系？导致大气水汽含量日变化的影响因子有哪些？这些都是今后亟需探索的问题。今后的工作将针对复杂地形下山盆环流日变化及其对大气水汽含量分布的影响机制开展进一步的研究工作，以期为更好的理解极端干旱地区水分循环过程提供科学依据。

参考文献(References):

陈宏,林炳章,张叶辉.2014. PMP估算中大气可降水量计算方法的探讨[J].水文,34(3):1-5. Chen H, Lin B Z, Zhang Y H. 2014. Comparison of calculation methods for estimating atmospheric precipitable water in estimation of PMP [J]. Journal of China Hydrology, 34(3): 1-5 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1000-0852.2014.03.001

崔丽娜,史玉光,崔彩霞,等.2010.塔克拉玛干沙漠腹地2009年大气水汽含量的日变化特征[J]. 干旱气象,28(4):407-410. Cui L N, Shi Y G, Cui C X, et al. 2010. Diurnal variation of atmospheric water vapor content in 2009 over Taklimakan desert [J]. Journal of Arid Meteorology,28(4): 407-410 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1006-7639.2010.04.006

李国平,黄丁发.2004. GPS遥感区域大气水汽总量研究回顾与展望[J].气象科技,32(4):201-205. Li G P, Huang D F. 2004. Reviews and prospects of researches on remote sensing of regional atmospheric water vapor using ground-based GPS [J]. Meteorological Science and Technology,32(4):201-205 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1671-6345.2004.04.001

刘晶,于碧馨,赵克明,等.2018.乌鲁木齐“4.24”短时降水和冰雹中小尺度特征对比分析[J].暴雨灾害,37(4):347-355. Liu J, Yu B X, Zhao K M, et al. 2018. Comparative analysis on the medium and small scale characteristics of the "4.24" short-term rain and hail storms in Urumqi [J]. Torrential Rain and Disasters,37(4): 347-355 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004-9045.2018.04.007

刘晶,刘兆旭,杨莲梅,等.2023.西风带大陆高压外围新疆哈密地区典型暴雨事件水汽输送特征对比分析[J].气象,49(9):1045-1062. Liu J, Liu Z X, Yang L M, et al. 2023. Comparative analysis of water vapor transport characteristics during typical rainstorm events around westerlies continental high in Hami areas,Xinjiang [J]. Meteorological Monthly,49(9):1045-1062 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2023.062801

刘蕊,杨青,王敏仲.2010.再分析资料与经验关系计算的新疆地区大气水汽含量比较分析[J].干旱区资源与环境,24(4):77-85. Liu R, Yang Q, Wang M Z. 2010. Intercomparison and analysis of the result about atmospheric precipitable water calculated by NCEP reanalysis and empirical formula [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 24(4):77-85 (in Chinese). doi:10.13448/j.cnki.jalre.2010.04.002

刘以林.1996.天气与气候[M].北京:燕山出版社. Liu Y L. 1996. Weather and climate [M]. Beijing:Yanshan Press(in Chinese)

苗运玲,卓世新,杨艳玲,等.2013.新疆哈密市近50 a蒸发量变化特征及影响因子[J].干旱气象,31(1):95-99. Miao Y L, Zhou S X, Yang Y L, et al. 2013. Variation of evaporation and its influence factors over Hami of Xinjiang in recent 50 years [J]. Journal of Arid Meteorology,31(1): 95-99 (in Chinese). doi:10.11755/j.issn.1006-7639(2013)-01-0095

王凯,孙美平,巩宁刚.2018.西北地区大气水汽含量时空分布及其输送研究[J].干旱区地理,41(2):290-297. Wang K, Sun M P, Gong N G. 2018. Spatial and temporal distribution and transportation of the water vapor in the northwestern China [J]. Arid Land Geography,41(2):290-297 (in Chinese). doi:10.13826/j.cnki.cn65-1103/x.2018.02.009

向华,周月华,王海军.2007.湖北省空中水资源分析[J].暴雨灾害,26(2): 40-44. Xiang H, Zhou Y H, Wang H J. 2007. A climatic research of cloud-water resources in Hubei province [J]. Torrential Rain and Disasters,26(2):40-44 (in Chinese). doi:1004- 9045(2007)02-0134-05

姚俊强,杨青,黄俊利,等.2012.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,29(4):567-573. Yao J Q, Yang Q, Huang J L, et al. 2012. Computation and analysis of water vapor content in the Tianshan mountains and peripheral regions, China [J]. Arid Zone Research,29(4):567-573 (in Chinese). doi:10.13866/j.azr.2012.04.018

杨青,魏文寿,李军. 2008.塔克拉玛干沙漠及周边地区大气水汽量的时空变化[J]. 科学通报,53(Z2):62-68. Yang Q, Wei W S, Li J. 2008. Temporal and spatial variation of atmospheric water vapor in the Taklimakan Desert and its surrounding areas [J]. Chinese Science Bulletin, 53(Z2):62-68 (in Chinese). doi:10.1360/csb2008-53-zkII-62

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]. Meteorological Monthly, 45(12):1691-1699 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2019.12.006

张学文.2004.可降水量与地面水汽压力的关系[J].气象,30(2):9-11. Zhang X W. 2004. A relationship between precipitable water and surface vapor pressure [J]. Meteorological Monthly,30(2):9-11 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2004.2.002

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 Research,23(4):654-657 (in Chinese). doi:10.13866/j.azr.2006.04.025

Benevides P, Catalao J, Miranda P M. 2015. On the inclusion of GPS precipitable water vapor in the nowcasting of rainfall [J]. Natural Hazards & Earth system science,15(12):2605-2616. doi:10.5194/nhess-15-2605-2015.

Chen L C, Bradley A A. 2006. Adequacy of using surface humidify to estimate atmospheric moisture availability for probable maximum precipitation [J]. Water Resources Research, 42:W09410. doi:10.1029/2005wr004469

Zhang Y, Cai C, Chen B, et al. 2019. Consistency evaluation of precipitable water vapor derived from ERA5, ERA-Interim, GNSS, and radiosondes over China [J]. Radio Science,54(7):561-571. doi:10.1029/2018RS006789

(责任编辑 张 文)