

程鹏, 罗汉, 刘琴, 等, 2021. 基于地基 GPS 的祁连山大气可降水量特征[J]. 气象, 47(9): 1135-1145. Cheng P, Luo H, Liu Q, et al, 2021. Characteristics of precipitable water vapor in Qilian Mountains based on ground-based GPS data[J]. Meteor Mon, 47(9): 1135-1145(in Chinese).

基于地基 GPS 的祁连山大气可降水量特征^{*}

程 鹏^{1,2} 罗 汉¹ 刘 琴³ 李宝梓¹ 曹彦超⁴ 尚子激⁵

1 甘肃省人工影响天气办公室, 兰州 730020

2 中国气象局云雾物理环境重点实验室, 北京 100081

3 兰州大学资源环境学院, 兰州 730020

4 甘肃省庆阳市气象局, 庆阳 745000

5 兰州市气象局, 兰州 730020

提 要: 利用 2016—2018 年祁连山区中东部 11 个站的地基 GPS 反演的大气可降水量(以下简称 GPS/PWV), 分析了大气可降水量的时空分布、地带性和垂直变化特征。结果表明: 与张掖和民勤探空实测资料计算的 PWV(以下简称 RS/PWV)相比, GPS/PWV 均方根误差和偏差平均值分别为 2.1 mm 和 1.07 mm, GPS/PWV 略大于 RS/PWV 且两者相关系数平均值达到 0.97。祁连山中东部 PWV 日最大值出现在 11—16 时, 日最小值出现在 01—05 时; PWV 的月最大值出现在 8 月, 月最小值出现在 1—2 月; PWV 的季节分布为夏季>秋季>春季>冬季; PWV 高值区主要分布在祁连山东南部, 祁连山中部的刚察、民和为明显低值区; 祁连山中段 PWV 低于东段。PWV 地带性和垂直变化特征明显, 与海拔高度的相关系数达到了 -0.77。PWV 随经度自西向东, 逐渐升高; PWV 随纬度从南往北, 存在着“高一低一高”的变化特征; PWV 的空间分布和季节变化与季风影响相关。

关键词: 大气可降水量(PWV), GPS, 变化特征, 祁连山

中图分类号: P468, P412

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2021.09.009

Characteristics of Precipitable Water Vapor in Qilian Mountains Based on Ground-Based GPS Data

CHENG Peng^{1,2} LUO Han¹ LIU Qin³ LI Baozi¹ CAO Yanchao⁴ SHANG Ziwei⁵

1 Gansu Weather Modification Office, Lanzhou 730020

2 Key Laboratory for Cloud Physics of China Meteorological Administration, Beijing 100081

3 College of Earth and Environmental Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730020

4 Qingyang Meteorological Office of Gansu Province, Qingyang 745000

5 Lanzhou Meteorological Bureau of Gansu Province, Lanzhou 730020

Abstract: In this paper, the GPS-PWV (GPS/PWV) of GPS inversion of 11 stations in the central and eastern Qilian Mountains from 2016 to 2018 is used to analyze the characteristics of the spatio-temporal distribution, zonality and vertical charge of precipitable water vapor. The results show that compared to the PWV calculated from sounding data from Zhangye and Minqin stations, the average root-mean-square error and deviation are 2.1 mm and 1.07 mm respectively. GPS/PWV is slightly larger than RS/PWV, and the correlation coefficient of the two results reaches 0.97. The PWV in the central and eastern Qilian Mountains

^{*} 西北区域人工影响天气能力建设项目研究试验项目(ZQC-R18208)、中国气象局云雾物理环境重点开放实验室开放课题(2018Z01603)、甘肃省自然科学基金项目(20JR10RA455)和甘肃省气象局科研重点项目(Zd2021-03)共同资助

2020 年 7 月 2 日收稿; 2021 年 5 月 28 日收修定稿

第一作者: 程鹏, 主要从事人工影响天气研究. E-mail: tffreefish@163.com

has characteristics of obvious daily, monthly and seasonal variations. The daily maximum of PWV appears between 11:00–16:00 BT and the minimum between 01:00–05:00 BT. The monthly maximum occurs in August, and the monthly minimum is in January–February. The PWV seasonal variation shows a decreasing order from summer to autumn, spring and winter. The areas with high PWV values are mainly located in the southern part of Qilian Mountains, with obvious low-value areas at Gangcha and Minhe stations in the middle section of Qilian Mountains. PWV has obvious characteristics of zonality and vertical change. The correlation coefficient between PWV and altitude reaches -0.77 . PWV increases gradually from west to east with longitude, showing a change of high–low–high trend from south to north. In addition, the spatial distribution and seasonal change of PWV are also related to the effect of monsoon.

Key words: precipitable water vapor (PWV), GPS, variation characteristic, Qilian Mountains

引 言

大气中的水汽是空中云水资源的重要组成部分,虽然在大气中的含量不高(占比约为 $0.1\% \sim 3\%$),但在各种尺度的天气过程中发挥着重要作用,充足的水汽条件是成云致雨的必要条件(盛裴轩等,2013;秦鑫等,2020)。大气可降水量(PWV)是指单位面积上整层大气水汽全部凝结降至地面的降水量(于晓晶等,2019),是表征大气中水汽含量的重要指示因子,对于研究降水形成及其预报非常重要(刘健文等,2005)。有效的利用各种手段对大气水汽进行探测研究,对天气、气候、人工影响天气等的研究及应用具有重要意义(曾光平等,1993;李霞和张广兴,2003;郭学良等,2013)。

相比较于探空、地基微波辐射计、卫星红外遥感等探测技术手段,地基 GPS 探测反演大气可降水量具有精度高、时空分辨率高等优点(段晓梅和曹云昌,2018;李光伟等,2018;胡烜等,2019),地基 GPS 遥感的大气可降水量与微波辐射计探测反演结果的均方根误差小于 2 mm (Baelen et al, 2005)。美国学者首先应用 GPS 测量大气水汽并提出了地基 GPS 估算大气水汽含量的原理(Askne and Brosset, 1972;Bevis et al, 1992;1994;Yao et al, 2013),基于 GPS 探测的大气可降水量反演技术和方法得到研究者的广泛关注并迅速发展(陈小雷等,2007;楚艳丽等,2007;王继竹等,2014;刘晶和杨莲梅,2017)。研究发现,受地形、下垫面及天气气候背景的影响,大气降水量的分布具有极大的差异(邹进上和刘惠兰,1981;翟盘茂和周琴芳,1997;蔡英等,2004),我国大气可降水量存在“南方大、西北小,夏季大、冬季小”的时空分布特征,并与东亚低层大气环流的关系密切(邹进上和刘惠兰,1981);大气可降水量分布

随时间具有明显的季节和日变化特征(梁宏等,2006;柳典和刘晓阳,2009)。西北地区大气可降水量总体呈增加趋势,平均每 10 年增加 0.11 mm ,大气可降水量高值区主要分布在西北东部地区,低值区主要分布在西北中部地区(黄小燕等,2018)。

祁连山是我国河西走廊重要的生态屏障;受西风带和季风环流耦合的影响,祁连山空中水汽资源非常丰富,形成了一个比较特殊的大地形降水区(张强等,2007)。该区域年大气可降水量变化呈现增加趋势,云和大气可降水量具有明显的季节变化特征,存在春季到夏季先升高后减少的变化特征(王宝鉴等,2006;朱飙等,2019);水汽输入主要在 600 hPa 以下层(张良等,2007);祁连山地区的大气水汽含量空间分布呈东南多、西北少的空间分布特征(巩宁刚等,2017);利用 GPS 资料分析祁连山中南部夏季大气降水量的日变化特征及成因发现,大气降水量的日变化与气温和比湿等气象要素相关(梁宏等,2010)。受青藏高原地形、西风环流作用和复杂地貌格局的影响,祁连山区大气可降水量不仅空间分布不均匀,且随时间变化快,其水汽分布及降水产生机理与我国东部季风区有着明显差异,天气气候特征较为独特。空气中的水汽是降水形成的物质基础,在全球气候变暖背景下,我国西北地区气候暖湿化现象明显(Zhang et al, 2019),已出现空中水循环加快,降水明显增加的特征(巩宁刚等,2017)。在此背景下,祁连山区的大气可降水量又呈现出何种变化特征? 由于受观测资料、技术手段限制,对祁连山区大气可降水量分布及变化特征的认识还不够定量和科学,不能满足社会经济发展的需要。因此,充分利用新型观测技术手段和方法研究祁连山区域大气降水量的变化很有必要。本文利用 GPS 反演资料,对祁连山区中东部的大气可降水量分布和变化特征进行分析,同时采用周边探空资料加以验证,以期深

层次认识祁连山地区的大气可降水量分布特征和变化规律,为该地区生态修复和合理开发利用空中云水资源提供参考依据。

1 研究区概况

祁连山呈西北—东南走向,位于青藏高原东北边缘,地处青藏、内蒙古、黄土三大高原交汇地带,东西长为 800 km,南北宽为 200~400 km,海拔高度在 3 000~6 000 m 的地形高程变化较大,地形复杂。祁连山气候受大陆性气候和青藏高原气候的综合影响,属温带半干旱气候区,其降水兼具中国东部、青藏高原和黄土高原三类雨季区特征,降水空间分布很不均匀,山前低山属荒漠气候,年均温度为 6℃左右,年降水量约为 150 mm;中山下部属半干旱草原气候,年均温度为 2~5℃,年降水量为 250~300 mm;中山上部为半湿润森林草原气候,年均温度为 0~1℃,年降水量为 400~500 mm;亚高山和高山属寒冷湿润气候,年均温度为 -5℃左右,年降水量约 800 mm,随海拔高度的增加降水有增加的趋势。山地东部气候较湿润,西部较干燥。祁连山是青藏高原与内蒙古高原和黄土高原的分界线,在自然气候分区上起着非常重要的作用(张强等,2009);受西风带、偏南季风(南亚季风和高原季风)和东亚季风

的共同影响,其上空云水资源丰富,降水充沛,培育了永久性的山地冰川和积雪,发育了石羊河、黑河和疏勒河等内陆河流。

2 资料和分析方法

2.1 资料介绍

祁连山区中东部共有 11 个地基 GPS 站点,分布在甘肃和青海境内(图 1),其中甘肃境内 7 个,青海境内 4 个,站点经纬度和海拔高度见表 1;经计算,此次研究的各站点间的地方时差在 1~15 min 内,因此各站点间因地方时的差异可忽略不计。GPS 原始资料通过 GAMIT 软件解算处理,反演得到 1 h 间隔的 PWV 数据(以下简称 GPS/PWV),所用 GPS 资料时段为 2016 年 5 月至 2018 年 10 月,在统计分析前,对 GPS/PWV 资料进行了质量控制。为进一步验证研究时段资料的可靠性,利用张掖、民勤探空站每日两次的 08 时和 20 时(北京时,下同)的探空资料计算 PWV(以下简称 RS/PWV),与对应时次和对应站点的 GPS/PWV 资料进行比较。张掖、民勤 GPS 站均在当地气象观测站内,满足 GPS 站与探空站水平距离在 50 km 以内且海拔落差小于 100 m 的对比条件(Wang and Zhang,2008),

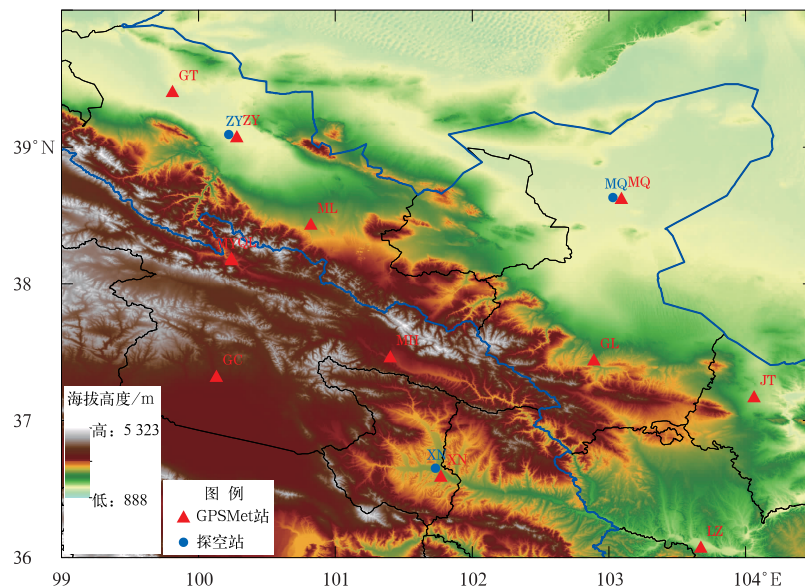


图 1 祁连山中东部 GPS 站和周边探空站分布
(GT:高台,ZY:张掖,ML:民乐,GL:皋兰,MQ:民勤,LZ:兰州,
JT:景泰,MY:门源,GC:刚察,MH:民和,XN:西宁)

Fig. 1 Distribution of GPS stations and sounding stations in the central and eastern Qilian Mountains
(GT: Gaotai, ZY: Zhangye, ML: Minle, GL: Gaolan, MQ: Minqin, LZ: Lanzhou,
JT: Jintai, MY: Menyuan, GC: Gangcha, MH: Minhe, XN: Xining)

表 1 站点基本信息

Table 1 The basic information of sites

站名	简称	纬度/°N	经度/°E	海拔高度/m
高台	GT	99.81	39.41	1300.8
张掖	ZY	100.28	39.08	1428.6
民乐	ML	100.82	38.44	2243.1
皋兰	GL	102.89	37.46	2067.6
民勤	MQ	103.09	38.63	1321.9
兰州	LZ	103.67	36.08	1570.0
景泰	JT	104.06	37.18	1606.2
门源	MY	100.24	38.18	3280.4
刚察	GC	100.13	37.33	3280.4
民和	MH	101.40	37.47	2977.8
西宁	XN	101.77	36.60	2362.1

两者可进行比较。

2.2 计算方法

大气可降水量(PWV)根据单位气柱中的水汽含量计算得到,即:

$$W = \frac{1}{g} \int_{p_t}^{p_s} q dp \quad (1)$$

$$q = 0.622 \frac{e}{p} \quad (2)$$

$$e = 6.11 \times 10^{\frac{7.45T_d}{(234+T_d)}} \quad (3)$$

式中: W 为单位气柱中的水汽含量(单位: mm), g 为重力加速度, p_s 、 p_t 分别为地面气压、大气上界气压, q 为比湿, T_d 为规定层露点温度, e 为水汽压。

表 2 2016—2018 年 GPS/PWV 和 RS/PWV 检验统计值

Table 2 GPS/PWV and RS/PWV statistics test values from 2016 to 2018

站点	时间/BT	N/个	RMSE/mm	Bias/mm	相对偏差/%	R
张掖	08 时	423	2.55	1.08	0.37	0.96
	20 时	414	2.37	1.38	0.47	0.97
民勤	08 时	521	1.90	0.88	0.26	0.98
	20 时	600	1.71	0.94	0.27	0.98

图 2 为民勤、张掖两站 08 时和 20 时的 GPS/PWV 与 RS/PWV 的散点分布。可以看出, GPS/PWV 整体上略大于 RS/PWV, 两种探测方式反演或计算得到的 PWV 绝大部分值密集分布在拟合直线附近, 两站两个时次的拟合直线斜率在 1.0 附近。从相关系数来看, 两站不同时间 GPS/PWV 和 RS/PWV 相关系数均达到了 0.96 以上, 在 0.01 水平上显著相关, 民勤站 GPS/PWV 和 RS/PWV 相关性更好(图 2a、2b), 相关系数在 0.98 以上。可以看出, GPS 反演结果与探空计算结果具有较好的相关

考虑到实际大气中 300 hPa 以上大气水汽含量很少, 本文计算时大气上界气压选择 300 hPa。

3 结果分析

3.1 GPS/PWV 数据验证

PWV 的计算方法主要有四类: 包括探空实测资料计算、再分析资料估算、地面经验公式估算和多源遥感探测方法, RS/PWV 结果准确客观, 但因探空站点稀疏所以无法全面反映水汽变化特征, 因此其常被用于验证其他方法的准确性(于晓晶等, 2019)。表 2 和图 2 分别为分析时段内 08 时和 20 时张掖和民勤站 GPS/PWV 的检验统计值和散点图, 由表 2 可以看出, 民勤站样本数(N)略多于张掖站, 张掖、民勤两站均方根误差(RMSE)为 1.71~2.55 mm, 离散度较小, 民勤站 RMSE 小于张掖站; 两站 08 时 GPS/PWV 的 RMSE 均大于 20 时。两站 GPS/PWV 值与 RS/PWV 探测计算结果相比均为正值, 偏差(Bias)为 0.88~1.38 mm, 表明 GPS/PWV 值比 RS/PWV 偏大, 这与韩辉邦等(2020)对柴达木盆地格尔木站的研究结论一致。民勤站的 Bias 小于张掖站, 两站 08 时的 Bias 均小于 20 时。两站两个时次的相对偏差均在 0.5% 之内。

性, 两者 RMSE 较小。从 GPS/PWV 和 RS/PWV 相关性来看, 本文所选站 GPS/PWV 和 RS/PWV 相关系数要高于天山山区(于晓晶等, 2019)和柴达木盆地(韩辉邦等, 2020)的分析结果。

通过民勤、张掖两站 GPS/PWV 与 RS/PWV 的检验表明, RMSE 和 Bias 平均值分别为 2.1 mm、1.07 mm, 相关系数平均值为 0.97, 结果表明: GPS/PWV 反演结果和 RS/PWV 计算结果非常接近, 本文中所用的 GPS/PWV 资料具有较高的可信度。

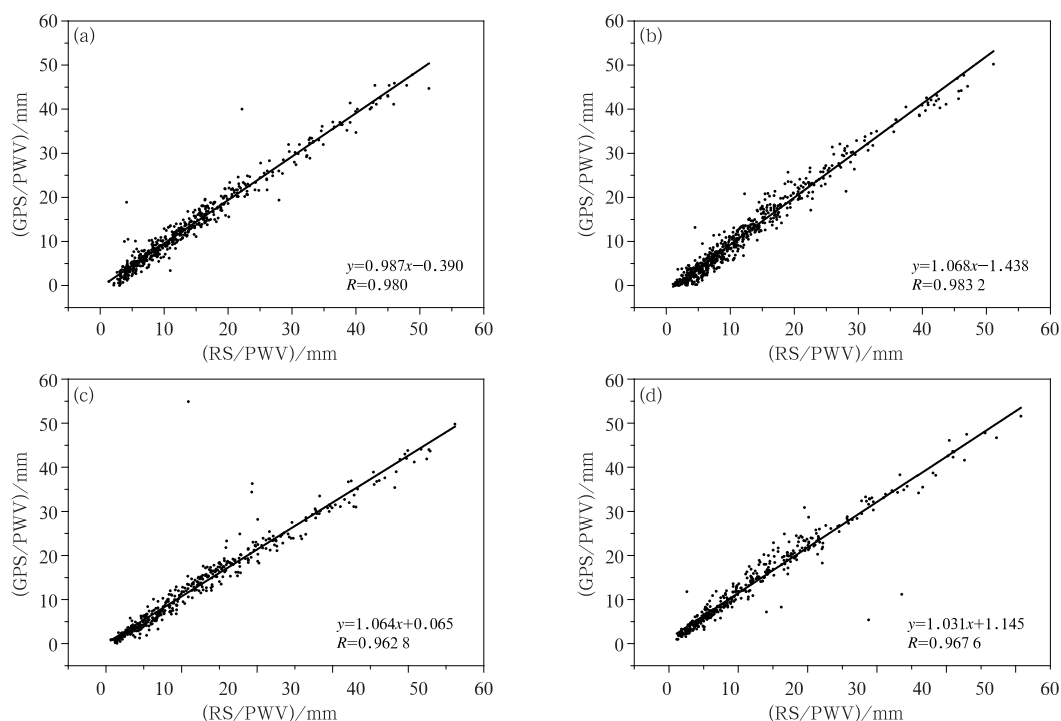


图2 2016—2018年民勤(a,b),张掖(c,d)的08时(a,c)和20时(b,d)GPS/PWV与RS/PWV散点

Fig.2 Scatter plots of GPS/PWV and RS/PWV at Minqin (a, b) and Zhangye (c, d)

stations at 08:00 BT (a, c) and 20:00 BT (b, d) from 2016 to 2018

3.2 GPS/PWV 水汽时间变化

3.2.1 日变化

图3为祁连山中东部11个站GPS/PWV的日变化特征,各站小时降水量标准差在0.2~0.5 mm。PWV与随海拔高度的变化有一定的关系,在分析各站PWV日变化特征时,根据测站海拔高度对站点进行了划分。图3a、3b和3c分别是海拔高度1600 m及以下、1600~2900 m和2900 m以上的站点PWV日变化曲线。图3a中,民勤和张掖站PWV日变化幅度较其他站明显偏大,峰、谷值出现时间也不同。张掖站PWV日最大值出现在13时,最小值在10时;民勤站PWV日最大值出现在09时,最小值在13时;其他3个站PWV日最大值出现在13—14时,最小值出现在01时。图3b中3个站变化趋势基本一致,PWV日最大值呈“双峰型”分布特征,峰值分别出现在11时和14—16时,PWV日最小值出现在05时。与1600 m以下的站点相比较,PWV日最大值出现时间明显偏早,日最小值出现时间偏晚。图3c中各站PWV日最大值呈“单峰型”分布特征,峰值出现在12时,PWV日最小值均出现在03—05时;PWV日最大值和最小

值出现时间接近1600~2900 m的站点。可以看出,低海拔站点的PWV日变化相对平缓,大部分站点PWV最小值出现在夜间01—05时,之后持续缓慢上升,至13—16时达到最大值,随后转为减小趋势。这种变化规律与日温度变化相似,日出后气温逐渐上升,地表水蒸发至大气中,空气湿度上升,PWV随之增加,傍晚至夜间地表蒸发减弱,伴随大气的水平运动,PWV转为下降趋势。

3.2.2 月变化和季节变化

图4a为祁连山中东部11个站PWV的月变化,各站PWV月变化趋势特征基本一致,均为明显的“单峰型”分布特征,7—8月PWV值较大,大部分站点值大于15 mm,1—2月PWV值最小。PWV从2月开始逐渐增加,大部分站点峰值出现在8月,8月后迅速减小。7月下旬至8月中旬是西太平洋副热带高压脊线位置最偏北的时候,东亚季风将南海及孟加拉湾的水汽输送到西北内陆地区(赵俊虎等,2014),祁连山区空气湿度及降水量达到年度峰值,大气可降水量迅速上升。门源和民和两站峰值出现在7月,略早于其他站,这可能与其所处的海拔高度和地理环境相关。各站PWV月平均值分布在

0.9~32.4 mm, 兰州站最大, 明显高于其他站, 民和、刚察站最小, 其他站接近。民和、刚察等山区站点明显小于祁连山北侧的低海拔区, 原因是低空偏南气流受祁连山脉阻挡, 沿山区东北侧边缘绕流, 使低海拔地区的大气水汽含量明显高于高海拔地区(段玮等, 2015)。

图 4b 为各站 PWV 季节变化, 春季到冬季表现出了先增大, 后减小的趋势。春、夏、秋、冬四季 PWV 平均值分别为 7.5、21.4、9.7、2.6 mm, 夏季 > 秋季 > 春季 > 冬季; 夏季各站 PWV 远高于其他

季节, 冬季各站间的差异最小。PWV 的这种季节变化受地理位置和大气环流的季节性调整影响较大, 大气环流的季节性变化决定了气流中携带水汽的多寡, 冬半年祁连山受高原冷高压控制, 水汽来源匮乏(申红艳等, 2012), 同时寒冷的天气也不利于地表水的蒸发, 因此空气湿度低; 夏半年随着季风的发展和增强, 南亚季风、高原季风携带的水汽和东亚季风越过秦岭将水汽输送至祁连山北麓, 祁连山区 PWV 迅速攀升(张强等, 2007)。

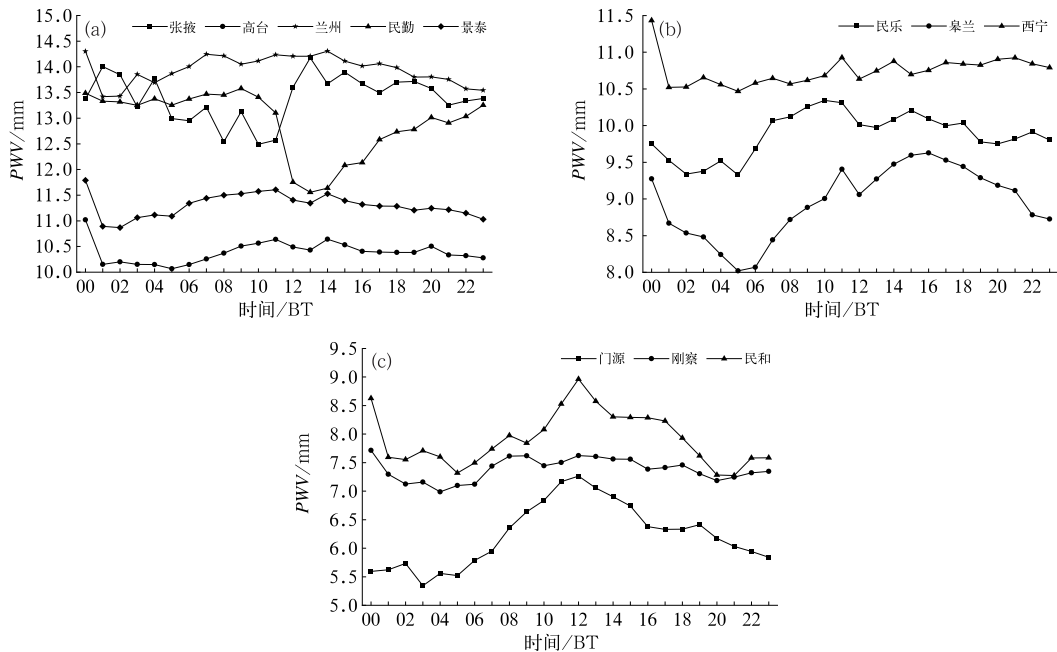


图 3 2016—2018 年祁连山区不同海拔高度 GPS/PWV 的日变化特征

(a) 海拔高度 < 1600 m, (b) 1600 m ≤ 海拔高度 < 2900 m, (c) 海拔高度 ≥ 2900 m

Fig. 3 Diurnal variation of GPS/PWV at different altitudes in Qilian Mountains from 2016 to 2018

(a) altitude < 1600 m, (b) 1600 m ≤ altitude < 2900 m, (c) altitude ≥ 2900 m

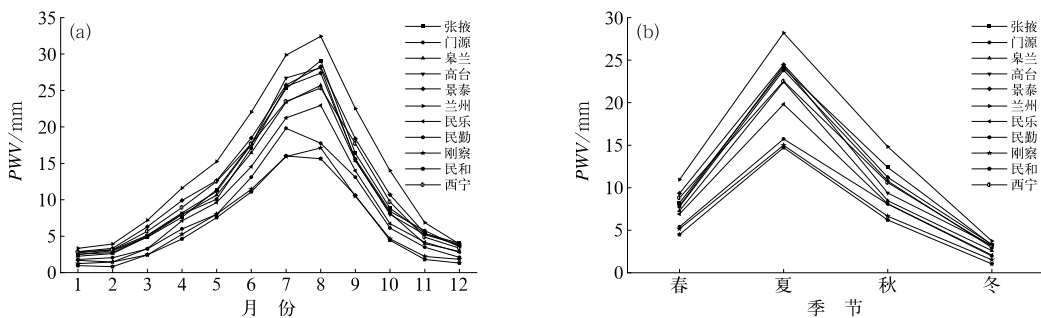


图 4 2016—2018 年祁连山区 GPS/PWV 的月变化(a)和季节变化特征(b)

Fig. 4 Monthly variation (a) and seasonal variation (b) of GPS/PWV in Qilian Mountains from 2016 to 2018

3.3 GPS/PWV 水汽时空分布

从 GPS/PWV 的时空分布来看(图 5),PWV 的季节空间分布与年均空间分布特征基本一致,不同季节和年均 PWV 沿西南、东北方向递减的梯度特征明显,祁连山东段 PWV 高于中段,祁连山北坡低海拔区域 PWV 明显高于南坡高海拔区域。PWV 高值区主要分布在祁连山东部海拔迅速降低区域,民和、刚察为明显低值区。PWV 沿西南、东北方向递减的这种分布特征和该区域降水的分布特征正好相反,这与降水转化率相关,民和、刚察降水转化率达到了 66%,大气水汽凝结转化为降水的效率较

高,而民勤等地降水转化率为 18%,转化率较低(巩宁刚等,2017)。祁连山区中东部 PWV 年平均值为 6~14 mm,分季节看,夏季 PWV 最高,秋季次之,冬季最低。夏季祁连山区域大气可降水量最为充沛,春季和秋季接近。PWV 的空间分布和季节差异与季风影响相关。张强等(2007)研究指出,祁连山中南部受偏南季风(南亚季风和高原季风)的影响特征较为明显,在祁连山的东部则是东亚季风的影响比较明显;因此,祁连山 PWV 的空间分布和季节变化特征主要受南亚季风、高原季风和东亚季风的扩展方向影响。同时,PWV 的分布与地形分布也有很好的对应关系,在地形特殊的地区往往会对应

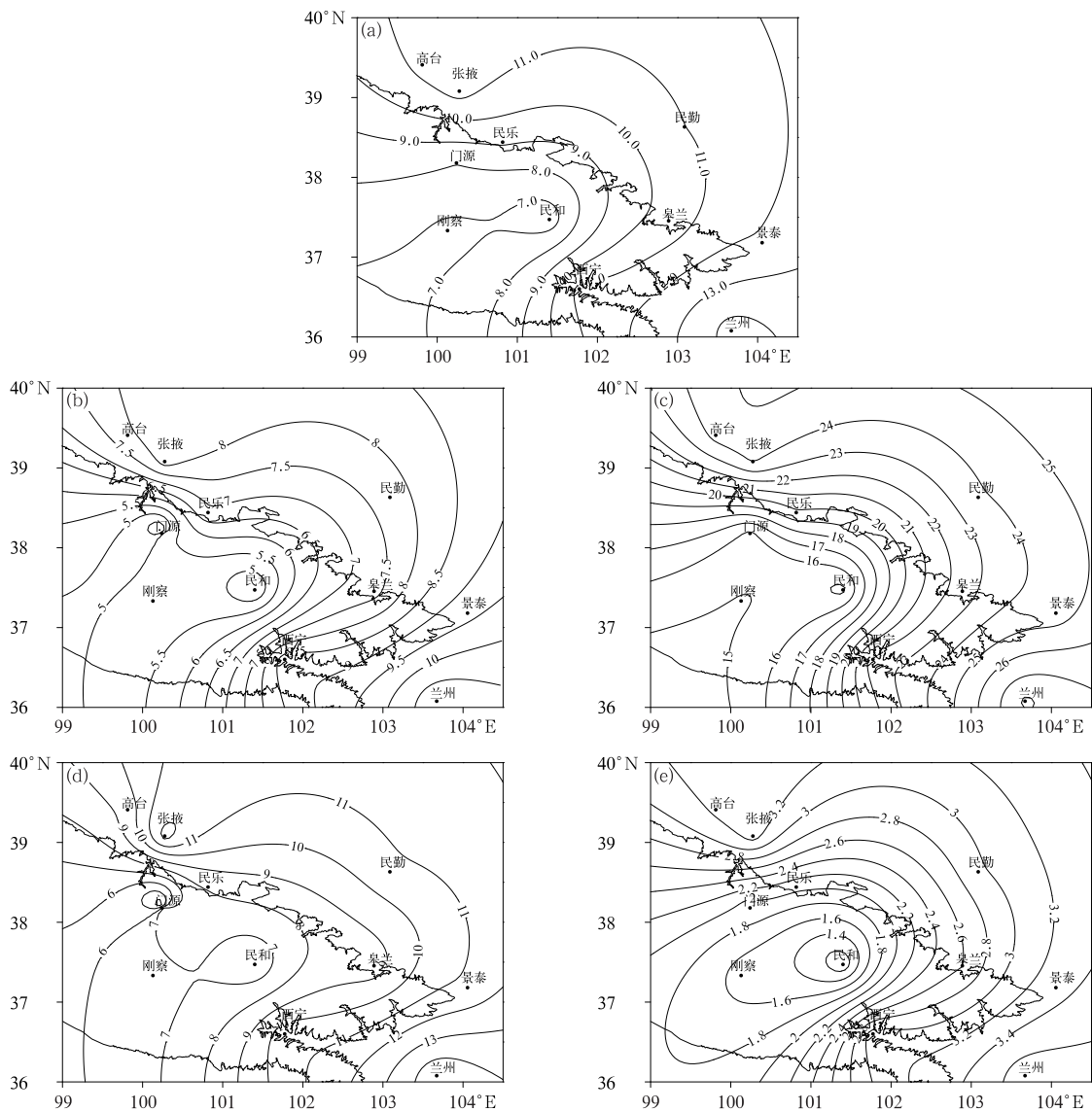


图 5 2016—2018 年祁连山区 GPS/PWV 的(a)年均,(b)春季,(c)夏季,(d)秋季,(e)冬季空间分布特征(单位:mm)

Fig. 5 Annual and seasonal spatial distribution of GPS/PWV in Qilian Mountains from 2016 to 2018 (unit: mm)

(a) annual average, (b) spring, (c) summer, (d) autumn, (e) winter

大气水汽含量的极值中心,如海拔高度较高的民和、刚察,对应着不同季节的 PWV 低值区。PWV 反映了该区域大气中水分含量的多寡,是人工增雨作业潜力的重要指标,从 PWV 的季节分布可以看出,除夏秋季外,春季也具备较好的人工增雨开发潜力,特别是在降水转化率较低的区域。

3.4 GPS/PWV 的地带性分布和垂直分布

水汽含量和降水与海拔高度有密切关系,气流遇迎风坡地形产生明显辐合抬升会导致降水增强(张沛等,2020)。海拔高度决定了大气柱厚度,直接影响大气含水量;纬度决定了大气的温度,对大气的持水能力有影响。利用各观测站点的经纬度和海拔高度等地理信息,分析 PWV 与经纬度和海拔高度的关系,揭示 PWV 的地带性分布和垂直分布规律。图 6 为各站点年 PWV 值随海拔高度的变化,总体来看,随海拔高度的增加 PWV 逐渐减小,这与 PWV 的计算方法对应,PWV 与海拔高度的相关系数达到了-0.77,在 0.01 水平上显著相关。高台、民勤、张掖、兰州和景泰 5 个站的海拔高度在 1600 m 以下且相差不大,但兰州和景泰的 PWV 值明显高于其他三站,由于兰州和景泰受东亚季风影响大,其带来较为充足的水汽,景泰又位于兰州的季风下游区,因此兰州的 PWV 最高,景泰次之;其余 3 个站受干燥的西风带气流影响,PWV 较兰州和景泰的低。皋兰、民乐和西宁的海拔高度在 2000~2500 m,皋兰和西宁主要受东亚季风控制,民乐主要受西风带控制,民乐的 PWV 最低,说明东亚季风控制下的地区 PWV 要高于西风带控制的地区。门源、民和和刚察的海拔高度在 3000 m 左右,民和的 PWV 值最低,说明在高海拔地区,西南气流主导的地区 PWV 要高于东亚季风控制的地区。

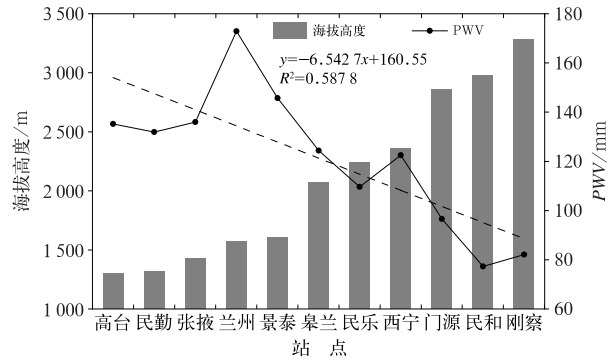


图 6 2016—2018 年 PWV 随海拔高度的变化特征

Fig. 6 Variation of PWV with different altitudes from 2016 to 2018

图 7 给出了祁连山 PWV 随经纬度的变化。可以看出,自祁连山中段向东,PWV 存在逐渐升高的变化特征(图 7a),这种变化规律反映了 PWV 经度地带性特征,即 PWV 西低东高,西风带和西南气流控制的地区 PWV 小于东亚季风控制的地区。在纬度方面,自南向北,PWV 存在着“高一低—高”的变化(图 7b),这与我们研究的站点海拔高度分布基本相同,自南向北,各站点海拔高度存在着“低—高一—低”的特点,并且纬度最南的兰州又处于水汽条件最充足的东亚季风控制下;拟合曲线的转折点在 38°N。说明了海拔高度对 PWV 的影响要强于西南气流所带水汽对 PWV 的影响。

因此,总的来说 PWV 随经度和纬度的这种变化特征主要原因是与各测站海拔高度有关,海拔高度越高,PWV 越低,次要原因是祁连山不同区域所受不同季风及其强弱变化有关,祁连山中部受偏南气流的影响特征较为明显,在祁连山的东部则是东亚季风的影响比较明显,在低海拔地区东亚季风主

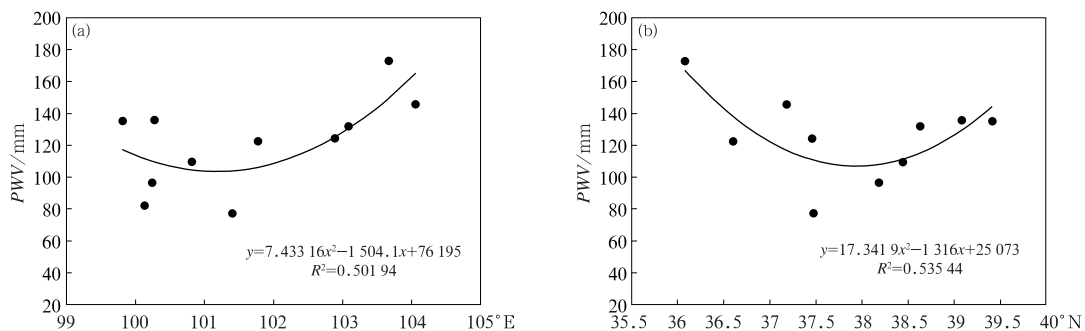


图 7 2016—2018 年祁连山区 GPS/PWV 和(a)经度,(b)纬度的变化关系

Fig. 7 The variation of GPS/PWV with different longitudes (a) and latitudes (b) in Qilian Mountains from 2016 to 2018

导的 PWV 要强于西南气流主导的 PWV,但在高海拔地区,西南气流主导的地区 PWV 要高于东亚季风控制的地区。

4 结论与讨论

利用祁连山中东部区域 11 个站的 GPS 反演 PWV 数据,分析了 GPS/PWV 的可用性,对该区域 PWV 的时空分布变化特征和原因进行了分析探讨,得到如下结论:

(1)GPS 反演的 PWV 与探空站计算值非常接近,均方根误差和平均偏差值分别为 2.1 mm、1.07 mm,与探空站计算的 PWV 相关系数平均值为 0.97,GPS/PWV 值略大于 RS/PWV。

(2)祁连山中东部 PWV 存在着明显的时间变化特征。PWV 日最大值出现在 11—16 时,日最小值出现在 01—05 时。PWV 月变化呈明显的“单峰型”分布特征,峰值出现在 8 月,1—2 月 PWV 值最小。春、夏、秋、冬四季 PWV 的平均值依次为 7.5、21.4、9.7、2.6 mm,夏季最大,春、秋季接近,冬季最小。春、夏和秋季均具备较好的人工增雨开发潜力。

(3)PWV 沿西南、东北方向递减的梯度特征明显,祁连山中段 PWV 低于东段;PWV 高值区主要分布在祁连山东南部,祁连山中部的刚察、民和为低值区。PWV 的空间分布和季节变化特征主要受季风变化影响。

(4)PWV 与海拔高度和地形分布相关,与海拔高度的相关系数达到了一 0.77。PWV 随经度自西向东逐渐升高,随纬度从南往北存在着“高一低一高”的变化特征。低海拔地区东亚季风主导的 PWV 要高于西南气流主导的 PWV,但在高海拔地区,西南气流主导的地区 PWV 要高于东亚季风控制的地区。

地基 GPS 提供的高时空分辨率的水汽数据,能够得到更为精细的水汽变化特征,可在降水预报及人工增雨作业中应用。从祁连山中东部 PWV 的季节分布可以看出,除夏秋季外,春季也具备较好的增雨开发潜力,因此,加强春、秋季祁连山区域的空中水资源开发有利于改善和维持该区域生态环境。

参考文献

蔡英,钱正安,吴统文,等,2004. 青藏高原及周围地区大气可降水量的分布、变化与各地多变的降水气候[J]. 高原气象,23(1):

1-10. Cai Y, Qian Z A, Wu T W, et al, 2004. Distribution, changes of atmospheric precipitable water over Qinghai-Xizang Plateau and its surroundings and their changeable precipitation climate[J]. Plateau Meteor, 23(1): 1-10 (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).

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. Chu Y L, Guo Y H, Zhang C L, et al, 2007. Application of the ground-based GPS/PW data to investigate the “7·10” heavy rainfall event in Beijing[J]. Meteor Mon, 33(12): 16-22 (in Chinese).

段玮,段旭,徐开,等,2015. 从水汽角度对青藏高原东南侧高空探测布局的分析[J]. 高原气象,34(2): 307-317. Duan W, Duan X, Xu K, et al, 2015. Research about radiosonde stations increase in southeast side of Qinghai-Xizang Plateau based on its water vapor characteristics[J]. Plateau Meteor, 34(2): 307-317 (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).

郭学良,付丹红,胡朝霞,2013. 云降水物理与人工影响天气研究进展(2008—2012 年)[J]. 大气科学,37(2): 351-363. Guo X L, Fu D H, Hu Z X, 2013. Progress in cloud physics, precipitation, and weather modification during 2008—2012[J]. Chin J Atmos Sci, 37(2): 351-363 (in Chinese).

巩宁刚,孙美平,闫露霞,等,2017. 1979—2016 年祁连山地区大气水汽含量时空特征及其与降水的关系[J]. 干旱区地理,40(4): 762-771. Gong N G, Sun M P, Yan L X, et al, 2017. Temporal and spatial characteristics of atmospheric water vapor and its relationship with precipitation in Qilian Mountains during 1979—2016[J]. Arid Land Geogr, 40(4): 762-771 (in Chinese).

韩辉邦,张小军,张博越,等,2020. 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,38(1): 50-57. Han H B, Zhang X J, Zhang B Y, et al, 2020. Accuracy test of precipitable water vapor retrieved by GPS data and its variation characteristic in Qaidam Basin[J]. J Arid Meteor, 38(1): 50-57 (in Chinese).

胡昶,曹云昌,梁宏,2019. L 波段探空观测偏差分析及订正算法研究[J]. 气象,45(4): 511-521. Hu H, Cao Y C, Liang H, 2019. Systematic errors and their calibrations for precipitable water vapor of L-band radiosonde[J]. Meteor Mon, 45(4): 511-521 (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).
- 梁宏,刘晶森,章建成,等,2006. 青藏高原大气总水汽量的反演研究[J]. 高原气象,25(6):1055-1063. Liang H, Liu J M, Zhang J C, et al, 2006. Research on retrieval of the amount of atmospheric water vapor over Qinghai-Xizang Plateau[J]. Plateau Meteor, 25(6):1055-1063(in Chinese).
- 柳典,刘晓阳,2009. 地基 GPS 遥感观测北京地区水汽变化特征[J]. 应用气象学报,20(3):346-353. Liu D, Liu X Y, 2009. Variation features of atmospheric precipitable water vapor derived from ground-based GPS in Beijing[J]. J Appl Meteor Sci, 20(3): 346-353(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).
- 刘健文,郭虎,李耀东,等,2005. 天气分析预报物理量计算基础[M]. 北京:气象出版社:27-28. Liu J W, Guo H, Li Y D, et al, 2005. The Base of Diagnosis Calculation in Weather Analysis and Prediction[M]. Beijing: China Meteorological Press: 27-28(in Chinese).
- 秦鑫,赵姝慧,马嘉理,等,2020. 辽宁地区大气可降水量与降水关系的研究[J]. 气象,46(1):80-88. Qin X, Zhao S H, Ma J L, et al, 2020. Relationship between atmospheric precipitable water vapor and precipitation in Liaoning Province[J]. Meteor Mon, 46(1):80-88(in Chinese).
- 申红艳,王冀,马明亮,等,2012. 青海高原冬季持续低温集中程度的气候特征及其成因[J]. 冰川冻土,34(6):1394-1402. Shen H Y, Wang J, Ma M L, et al, 2012. Winter persistence low temperature concentration degree over the Qinghai Plateau: climatic features and causes[J]. J Glaciol Geocryol, 34(6): 1394-1402(in Chinese).
- 盛裴轩,毛节泰,李建国,等,2013. 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, 2013. Atmospheric Physic[M]. Beijing: Peking University Press: 18-19(in Chinese).
- 王宝鉴,黄玉霞,王劲松,等,2006. 祁连山云和空中水汽资源的季节分布与演变[J]. 地球科学进展,21(9):948-955. Wang B J, Huang Y X, Wang J S, et al, 2006. The seasonal distribution and time-varying of the cloud and vapor flux in Qilian Mountain Areas[J]. Adv Earth Sci, 21(9):948-955(in Chinese).
- 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. Wang J Z, Guo Y L, Xu G R, et al, 2014. Error analysis of estimating precipitable water vapor from different databases in Hubei Province[J]. Meteor Mon, 40(11):1308-1315(in Chinese).
- 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).
- 曾光平,方仕珍,林芬,1993. 福建省夏旱期间空中水资源及人工降雨条件[J]. 气象,19(11):25-30. Zeng G P, Fang S Z, Lin F, 1993. The air water resources and the conditions for artificial precipitation in the summer drought periods in Fujian Province[J]. Meteor Mon, 19(11):25-30(in Chinese).
- 翟盘茂,周琴芳,1997. 中国大气水分气候变化研究[J]. 应用气象学报,8(3):342-351. Zhai P M, Zhou Q F, 1997. A study of climate changes of atmospheric water vapor in China[J]. J Appl Meteor Sci, 8(3):342-351(in Chinese).
- 张良,王式功,尚可政,等,2007. 祁连山区空中水资源研究[J]. 干旱气象,25(1):14-20, 47. Zhang L, Wang S G, Shang K Z, et al, 2007. Research on vapor and precipitation resources over the Qilian Mountain Area[J]. Arid Meteor, 25(1):14-20, 47(in Chinese).
- 张沛,姚展予,贾烁,等,2020. 六盘山地区空中水资源特征及水凝物降水效率研究[J]. 大气科学,44(2):421-434. Zhang P, Yao Z Y, Jia S, et al, 2020. Study of the characteristics of atmospheric water resources and hydrometeor precipitation efficiency over the Liupanshan area[J]. Chin J Atmos Sci, 44(2): 421-434(in Chinese).
- 张强,孙昭萱,陈丽华,等,2009. 祁连山空中云水资源开发利用研究综述[J]. 干旱区地理,32(3):381-390. Zhang Q, Sun Z X, Chen L H, et al, 2009. Reviews on studies of exploitation and utilization of cloud-water resource in the Qilian Mountains Region[J]. Arid Land Geogr, 32(3):381-390(in Chinese).
- 张强,张杰,孙国武,等,2007. 祁连山山区空中水汽分布特征研究[J]. 气象学报,65(4):633-643. Zhang Q, Zhang J, Sun G W, et al, 2007. Research on atmospheric water-vapor distribution over Qilianshan Mountains[J]. Acta Meteor Sin, 65(4): 633-643(in Chinese).
- 赵俊虎,支蓉,申茜,等,2014. 2012 年我国夏季降水预测与异常成因分析[J]. 大气科学,38(2):237-250. Zhao J H, Zhi R, Shen Q, et al, 2014. Prediction of the distribution of the 2012 summer rainfall in China and analysis of the cause for anomaly[J]. Chin J

- Atmos Sci, 38(2):237-250(in Chinese).
- 朱 颢, 张 强, 卢 国 阳, 等, 2019. 祁连山区空中水汽分布特征及变化趋势分析[J]. 高原气象, 38(5):935-943. Zhu B, Zhang Q, Lu G Y, et al, 2019. Analysis of the distribution characteristics and trend of air vapor in Qilian Mountains[J]. Plateau Meteor, 38(5):935-943(in Chinese).
- 邹进上, 刘惠兰, 1981. 我国平均水汽含量分布的基本特点及其控制因子[J]. 地理学报, 36(4):377-391. Zou J S, Liu H L, 1981. The basic features of distribution of water vapour content and their controlling factors in China[J]. Acta Geogr Sin, 36(4):377-391(in Chinese).
- Askne C, Brosset C, 1972. Determination of strong acid in precipitation, lake-water and air-borne matter[J]. Atmo Environ (1967), 6(9):695-696.
- Baelen J V, Aubagnac J P, Dabas A, 2005. Comparison of near-real time estimates of integrated water vapor derived with GPS, radiosondes, and microwave radiometer [J]. J Atmos Oceanic Technol, 22(2):201-210.
- Bevis M, Businger S, Chiswell S, et al, 1994. GPS meteorology: mapping zenith wet delays onto precipitable water[J]. J Appl Meteorol Climatol, 33(3):379-386.
- Bevis M, Businger S, Herring T A, et al, 1992. GPS meteorology: remote sensing of atmospheric water vapor using the global positioning system[J]. J Geophys Res, 97(D14):15787-15801.
- Wang J H, Zhang L Y, 2008. Systematic errors in global radiosonde precipitable water data from comparisons with ground-based GPS measurements[J]. J Climate, 21(10):2218-2238.
- Yao Y B, Zhang B, Yue S Q, et al, 2013. Global empirical model for mapping zenith wet delays onto precipitable water[J]. J Geod, 87(5):439-448.
- Zhang Q, Lin J J, Liu W C, et al, 2019. Precipitation seesaw phenomenon and its formation mechanism in the eastern and western parts of Northwest China during the flood season[J]. Sci China Earth Sci, 62(12):2083-2098(in Chinese).