

DOI:10.13476/j.cnki.nsbddqk.2021.0055

曹寿凯,魏加华,乔禛,等.地基GPS的大气可降水量反演精度验证[J].南水北调与水利科技(中英文),2021,19(3):520-527.
CAO S K, WEI J H, QIAO Z, et al. Verification of retrieval accuracy of PWV based on ground-based GPS signal[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2021, 19(3): 520-527. (in Chinese)

地基GPS的大气可降水量反演精度验证

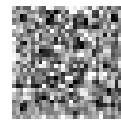
曹寿凯¹, 魏加华^{1,2,3}, 乔禛^{1,2}, 朱晓梅^{1,2}, 柏文文^{1,2}

(1. 青海大学水利电力学院, 西宁 810016; 2. 青海大学三江源生态与高原农牧国家重点实验室, 西宁 810016;
3. 清华大学水沙科学与水利水电工程国家重点实验室, 北京 100084)

摘要:地基全球定位系统(ground-based global positioning system, GPS)水汽探测是对探空的有效补充, 利用青藏高原5个典型GPS和探空站点数据, 基于姚宜斌模型分析GPS探测大气可降水量(precipitable water vapor, PWV)的精度及影响因素。结果表明:5个GPS站与临近探空站的探测精度相当, 均方根误差在2~3 mm, 反演结果可以用于分析代表区域的PWV; 基于GPS反演PWV, 零时刻(UTC0)探测精度优于十二时(UTC12)的值, 冬季的探测精度优于夏季, 可能受到地面温度和大气可降水量的影响。未来可以结合探空和GPS资料进行水汽反演, 为青藏高原水汽条件和降水预报提供数据支撑。

关键词:大气可降水量; 地基全球定位系统; 探空资料; 地面温度; 探测精度

中图分类号:TV213;P415 文献标志码:A 开放科学(资源服务)标志码(OSID):



大气可降水量(precipitable water vapor, PWV)是研究区域水汽分布和降水形成机理的重要参量, 是表征水汽的物理量。青藏高原是众多河流的发源地, 独特的地形和多变的气候条件对亚洲乃至全球气候有重要影响, 因此获取高精度和高时空分辨率的水汽资料对研究青藏高原降水、陆气耦合等具有重要意义。但是, 受交通、海拔等不利条件制约, 高原地区布设的水汽探测站点稀少且分布不均, 导致水汽探测精度差且时空分辨率低。

常规的水汽资料主要依赖地面和探空观测, 包括无线电探空仪(radio sonde, RS)、微波辐射计(water vapor radiometer, WVR)等。目前这些观测设备站点稀少、维护成本高, 区域代表性不足。全球定位系统(global positioning system, GPS)具有成本低、精度高、时间分辨率高以及全天候等优点, 被认为是监测PWV的有效手段^[1]。Askne等^[2]首次

推导出大气湿延迟和PWV的关系。1992年Bevis^[1]提出了GPS气象学的概念, 并利用天顶湿延迟(zenith wet delay, ZWD)反演大气整层水汽(integrated water vapor, IWV)。美国于1995年进行的GPS/RTORM实验证明了由地基GPS探测大气可降水量的可行性^[3]。Niel等^[4]通过比较无线电探空仪、水汽辐射计、GPS和甚长基线干涉发现基于GPS反演的PWV的精度在1 mm。王小亚等^[5]利用29个站组网进行GPS气象学试验, 发现GPS探测结果可靠。李成才等^[6]用上海和武汉的GPS资料反演了30 min间隔的水汽变化信息, 与探空资料相比其均方根误差约为5 mm。

为评价和验证分布在不同海拔、不同气候条件下GPS反演PWV的精度, 利用2017年1—11月GPS站点数据反演的PWV, 利用邻近探空资料(近似真值)对GPS反演精度进行评价和验证, 分析利

收稿日期:2020-09-03 修回日期:2021-03-01 网络出版时间:2021-03-08

网络出版地址:https://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1430.TV.20210308.1136.002.html

基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFC0403600);青海省重点研发与转化计划(2019-SF-146);清华大学水沙科学与水利水电工程国家重点实验室开放基金(SKLHSE-2019-B-03)

作者简介:曹寿凯(1994—),男,青海西宁人,主要从事水文水资源研究。E-mail:2283436977@qq.com

通信作者:魏加华(1971—),男,陕西汉中,教授,博士,主要从事水资源、水信息学研究。E-mail:weijiahua@tsinghua.edu.cn

用 GPS 反演水汽信息的可行性及影响水汽探测精度的主要因素。

1 数据与方法

1.1 数据

1.1.1 GPS 数据

GPS 数据来自中国构造环境监测网络。青藏高原 GPS 站点主要集中在高原东南部、西南部及昆仑山脉北侧,表 1 分别为西宁(XNIN)、都兰(QHDL)、格尔木(QHGE)、玉树(QHYS)和拉萨(LHAS)等 5 个站点分布和属性信息。西宁站位于青藏高原东部湟水中游河谷盆地,属高原大陆性气候,水汽来源主要为印度洋孟加拉湾上空的暖湿气团及太平洋副热带高压气团;都兰站位于柴达木盆地东南部,属高原大陆性气候^[7];格尔木位于柴达木盆地西南边缘,属典型的高原大陆性气候,水汽来源

主要为孟加拉湾西南气流^[8];玉树站位于长江源区,属温带半干旱季风气候,受中纬度西风带和南亚季风共同影响^[8];拉萨位于青藏高原中部,属高原温带半干旱季风气候,受印度洋水汽的影响^[7]。

1.1.2 探空数据

探空数据来源于怀俄明大学网站的数据共享(<http://weather.uwyo.edu/wyoming/>),数据集包含气压、位势高度、温度、露点差、比湿、大气密度、风向和风速等要素的观测值,每天观测 2 次(UTC0 和 UTC12 时刻)。与 GPS 站点数据同步,探空站点信息见表 1。WANG 等^[9]研究发现:利用探空资料验证 GPS 数据反演大气可降水量精度的前提是探空站点和 GPS 站点海拔差小于 100 m,水平距离不超过 50 km,且 GPS 反演 PWV 至少需要用 4 颗以上仰角高于 15°的卫星^[10],本文所用的 GPS 站点和探空站点基本满足精度验证要求。

表 1 研究区 GPS 站点及探空站点位置

Tab. 1 GPS stations and radiosonde stations in the study area

GPS 站点			探空站点			
站点名称	经度/(°)	纬度/(°)	海拔/m	站点名称	距 GPS 站点的距离/km	与 GPS 站点高度差/m
QHDL	98.10	36.30	3 149.25	52836	0.91	-42.75
QHGE	94.77	36.15	3 090.24	52818	31.60	281.24
QHYS	97.01	33.01	3 704.61	56029	0.44	22.61
XNIN	101.77	36.60	2 363.84	52866	12.35	67.84
LHAS	91.10	29.66	3 624.32	55591	1.75	-25.68

1.2 方法

1.2.1 利用 GPS 反演 PWV(GPS-PWV)

GPS 卫星信号传输经过大气层时会产生延迟和弯曲,分为电离层延迟(ionospheric delay)和对流层延迟(tropospheric delay)。其中,弯曲量较小而延迟量较大,通常能达到 2.3 m 左右,GPS 气象学利用对流层造成的延迟信息得到有关水汽信息^[11]。电离层延迟可以通过采用双频接收技术订正到毫米量级。对流层延迟在天顶方向投影得到天顶干延迟(zenith hydrostatic delay, ZHD)和天顶湿延迟(zenith wet delay, ZWD),其中 ZHD 由对流层模型求出,可以订正到毫米量级。利用基于双差法的国际高精度 GPS 数据处理软件 GAMIT 解算出天顶总延迟(zenith total delay, ZTD),精度可以达到毫米量级,这样就能得到毫米量级的 ZWD。利用 ZWD 与 PWV 的正比关系求解出沿天顶方向的 PWV,精度在毫米量级^[12]。

解算时采用 GPT2 对流层模型^[13],设置截止高度角为 10°。为消除相关性造成的系统误差,引入 3 个与待测点距离大于 500 km 的 IGS 参考站(BJFS、URUM 和 SHAO)进行基线处理^[13],以获取较高精度的 PWV。反演计算包括 ZTD 解算、ZWD 解算及 PWV 反演。

(1) 大气折射率

GPS 信号在对流层中传播的时间滞后,信号路径由折射指数(n)定义,折射指数用折射率(N)来表示,表达式^[14]为

$$N=10^6(n-1) \quad (1)$$

通常用式(2)^[15]表示为

$$N=10^6(n-1)=k_1 \frac{P_d(z)}{T} + k_2 \frac{P_w(z)}{T} + k_3 \frac{P_w(z)}{T^2} \quad (2)$$

式中: P_d 、 P_w 分别为随高度 z 变化的干空气和水汽的分压强, hPa; T 为温度, K; 系数 $k_1=(77.6 \pm 0.05)$

K/hPa, $k_2 = (64.80 \pm 0.08) \text{ K/hPa}$, $k_3 = (373.900 \pm 0.04) \text{ K/hPa}$ 。

(2) 天顶总延迟

天顶方向对流层延迟与大气折射率 N 有关^[16], 表示为

$$T_{ZTD} = 10^{-6} \int_0^{\infty} N dz \quad (3)$$

式中: T_{ZTD} 为天顶总延迟; “0” 表示大气折射率积分的起点。

大气折射率包括干延迟 (N_h) 和湿延迟 (N_w) 两部分

$$N = N_h + N_w \quad (4)$$

对流层 T_{ZHD} 是中性大气层的整体密度造成的延迟, 由式 (5)^[17-18] 表示:

$$T_{ZHD} = (0.002\ 276\ 8 \pm 0.002\ 4) \frac{P_{sur}}{f(\varphi, h)} \quad (5)$$

$$f(\varphi, h) = 1 - 0.002\ 66 \cos \varphi - 0.000\ 26h \quad (6)$$

式中: P_{sur} 为 GPS-MET 站点中气象采集仪测量的气压, hPa; φ 为纬度; h 为海拔高度, km; T_{ZHD} 的单位是 m。

对流层 T_{ZWD} 表示在对流层延迟中水汽引起的延迟, 由式 (7)^[16] 计算:

$$T_{ZWD} = T_{ZTD} - T_{ZHD} = 10^{-6} \left[k_2 \int \left(\frac{P_w}{T} \right) dz + k_3 \int \left(\frac{P_w}{T^2} \right) dz + \right] \quad (7)$$

式中: P_w 为水汽分压, hPa; T 为大气温度, K; k_2 和 k_3 为实验获得的折射率系数。Bevis 等^[14,19] 研究发现, T_{ZWD} 对折射率系数的敏感性很弱, 不同组折射率系数之间没有显著差异, 其误差在 PWV 处理的误差预算中可以忽略不计。

(3) 大气可降水量

基于 T_{ZWD} 计算 PWV, 公式为

$$T_{PWV} = \Pi T_{ZWD} \quad (8)$$

$$\Pi = \left[10^6 \left(\frac{k_3}{T_m} + k'_2 \right) R_v \rho_{water} \right]^{-1} \quad (9)$$

式中: T_{PWV} 为大气可降水量, m; Π 为无量纲系数; ρ_{water} 为液态水密度, 10^3 kg/m^3 ; 水汽比常数 $R_v = 461 \text{ J/(kg/K)}$; $k_3 = (3.776 \pm 0.014) \times 10^5 \text{ K}^2/\text{hPa}$, $k'_2 = 16.48 \text{ K/hPa}$; T_{ZWD} 的单位为 m; T_m 为大气加权平均温度, 表示为

$$T_m = \frac{\int \frac{P_v}{T} dz}{\int \frac{P_v}{T^2} dz} \quad (10)$$

式中: P_v 为水蒸气的分压, hPa; T 为热力学温度 K。

T_m 由探空仪提供的垂直剖面数据或线性经验关系计算。本文选取姚宜斌^[20] 的全球模型, 该模型

考虑了纬度的影响, 精度优于 Bevis 模型。姚宜斌模型对应本文研究区的纬度范围为 $15^\circ \text{ N} \sim 30^\circ \text{ N}$, $30^\circ \text{ N} \sim 45^\circ \text{ N}$ 。其中, 都兰、格尔木、西宁、玉树等地区的 T_m 计算模型为

$$T_m = 105.152\ 9 + 0.611\ 7 T_s \quad (11)$$

拉萨地区的 T_m 计算模型为

$$T_m = 0.603\ 4 + 0.953\ 3 T_s \quad (12)$$

式中: T_s 为地表湿度, K。

1.2.2 基于探空数据计算 PWV (Radio-PWV)

由探空数据计算 PWV 的公式^[21-22] 为

$$W = \frac{1}{g} \int_{P_1}^{P_2} x dp \quad (13)$$

式中: W 为探空传感器测量的在 P_2 和 P_1 之间计算的 PWV, kg/m^2 ; g 为重力加速度, 9.8 m/s^2 ; x 为混合比, g/kg ; 混合比的计算公式为

$$x = \frac{0.622e}{P - 0.378e} \quad (14)$$

式中: P 为总的大气压, hPa; e 为水汽压, hPa, 由 $e = H_R \cdot e_s(T)$ 求出; e_s 为饱和水汽压, Pa; H_R 为大气相对湿度, %。饱和水汽压 e_s 可由下式导出:

$$e_s = f \times 6.112\ 1 \exp \left[\frac{(18.729 - T/227.3)T}{T + 257.87} \right] \quad (15)$$

$$f = 1.000\ 7 + 3.46 \times 10^{-6} P \quad (16)$$

式中: T 为温度, $^\circ \text{ C}$; f 为修正函数。

2 T_{PWV} 的精度验证与分析

2.1 T_{PWV} 日探测精度

通常探空数据被认为精度高, 可以近似作为真值。为验证 T_{PWV} 的精度, 利用 GPS-PWV 与 Radio-PWV 计算得到的 UTC0 和 UTC12 时刻的 T_{PWV} 进行线性拟合, 见图 1。两种方法计算的 UTC0 和 UTC12 时刻 T_{PWV} 的统计对比结果见表 2。由图 1、表 2 可以看出: T_{PWV} 的大小与偏差呈现正相关, 各站的偏差在 $-6 \sim 4 \text{ mm}$; GPS-PWV 与 Radio-PWV 计算得到 T_{PWV} 逐日变化基本一致, 相关系数 r 为 $0.87 \sim 0.93$, 相关性较高; 除拉萨站外, 其他各站 UTC0 时刻的均方根误差 (root mean squared error, RMSE)、平均相对误差 (mean relative error, MRE) 均小于 UTC12 时刻, 同时 UTC0 时刻 GPS-PWV 与 Radio-PWV 的 r 均高于 UTC12 时刻。结合典型站点偏差分布 (图 2) 来看, 总体上 UTC0 时刻 T_{PWV} 偏差更集中且精度高于 UTC12 时刻的值, 可能是 T_{PWV} 受地面温度 (surface temperature, T_s) 影响。

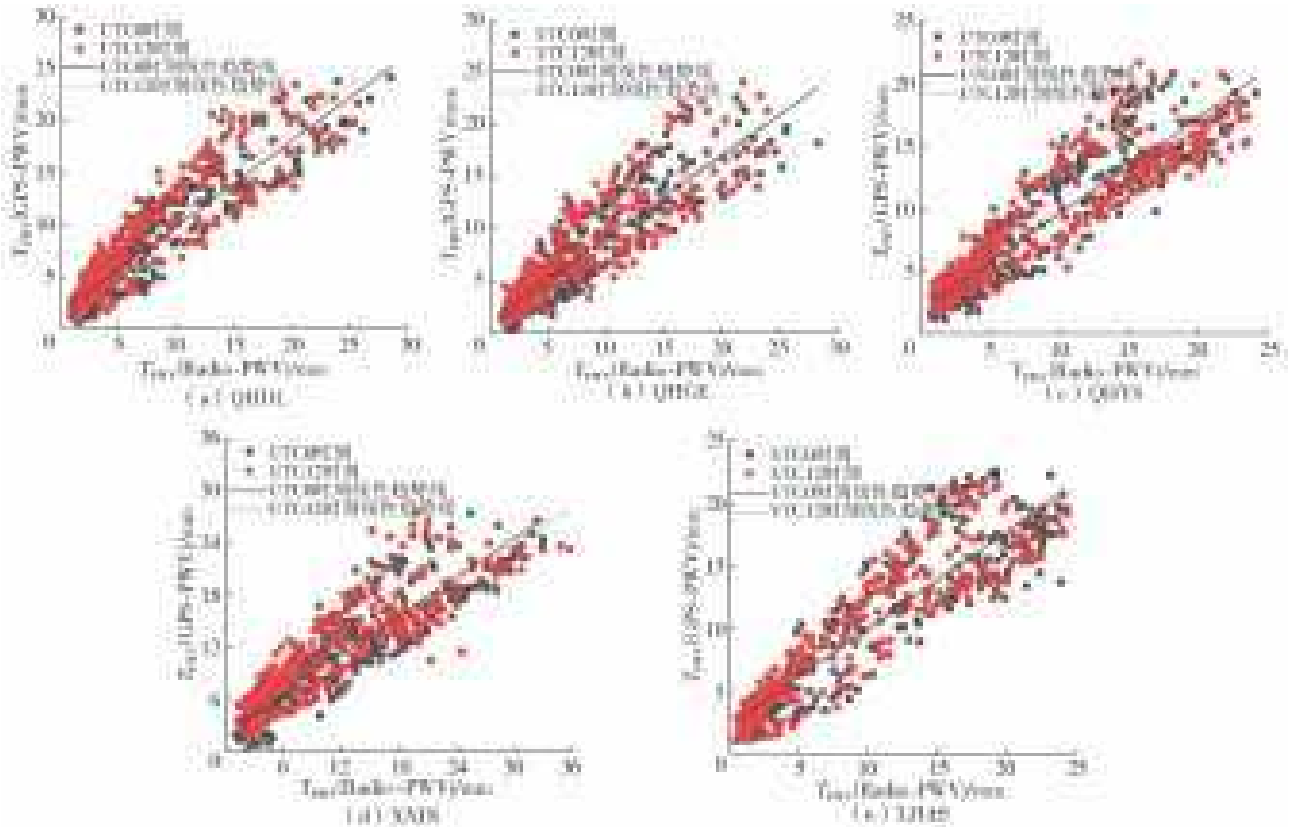


图1 GPS-PWV和 Radio-PWV计算的 T_{pwv} 在 UTC0 和 UTC12 时刻的拟合图
Fig. 1 Fitting diagram of GPS- T_{pwv} and Radio- T_{pwv} at UTC0 and UTC12

表2 GPS-PWV与 Radio-PWV的统计比较

Tab. 2 Statistical comparison between GPS-PWV and Radio-PWV

站点	样本数/d	时间	RMSE/mm	r	MBE/mm	MRE/%
QHDL	177	UTC0	2.02	0.93	0.26	31.81
		UTC12	2.30	0.91	1.19	45.76
QHGE	177	UTC0	2.14	0.91	-0.43	25.68
		UTC12	2.42	0.88	0.17	36.30
QHYS	182	UTC0	2.11	0.92	-0.21	29.42
		UTC12	2.26	0.90	-0.06	41.08
XNIN	179	UTC0	2.79	0.90	-0.74	27.28
		UTC12	2.85	0.88	0.30	43.26
LHAS	180	UTC0	2.51	0.91	0.05	38.20
		UTC12	2.32	0.92	0.48	56.31

注:平均偏差 MBE 为 GPS-PWV 计算的 T_{pwv} 减去 Radio-PWV 计算的 T_{pwv} 的差值。

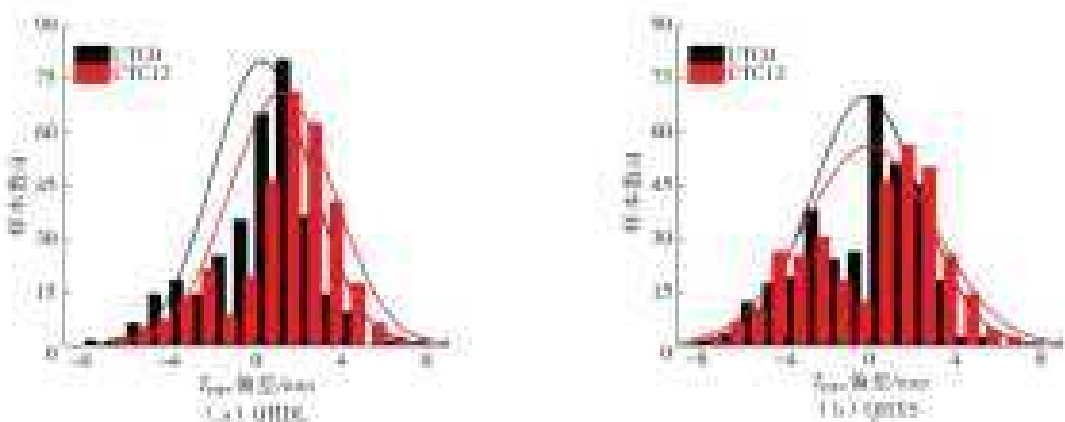


图2 GPS-PWV和 Radio-PWV在 UTC0 和 UTC12 时刻 T_{pwv} 偏差分布
Fig. 2 T_{pwv} deviation distribution histogram of GPS-PWV and Radio-PWV at UTC0 and UTC12

2.2 T_{PWV} 月探测精度

月均值能体现探测数据的整体差异,分析 5 个站点 GPS-PWV 与 Radio-PWV 计算的 T_{PWV} 逐月偏差,包括平均绝对偏差(mean absolute deviation, MAD)、RMSE、MRE 等参数能宏观地反映探测精度的年内变化。两种方法计算得到的 T_{PWV} 逐月偏差见表 3。由表 3 可知:6—9 月 MAD 较大,在 2.0~5.5 mm,11 月、1 月和 2 月相对较小,在 0.5~2.0 mm;5 个站中西宁站偏差最大,都兰站和格尔木站偏差变化较为稳定。RMSE 和 MAD 有相同的变化趋势,所有站点 RMSE 在 8 月份达到最大,其中西宁站的 RMSE 最大,UTC0 时刻和 UTC12 时刻分别为 5.05 mm 和 6.04 mm。RMSE 最小值出现在 1 月或者 2 月份,各站基本在 1.1 mm 左右。各站的 MRE 与 RMSE 和 MAD 趋势相反,在 5—9 月较小,11 月、1 月和 2 月相对较大,MRE 最小为 17%,最大为 154.34%。参考 GPS 数据和 Radio 数据,造成这种结果的可能原因是在 T_{PWV} 较低的月份,GPS-PWV 偏差普遍大于 Radio-PWV 导致 MBE 较大;在降水较为充沛的季节,GPS-PWV 计算的 T_{PWV} 偏差较大,GPS-PWV 和 Radio-PWV 计算的偏差大小不一,偏差正、负相抵,导致 MBE 较小。因此,在降水充沛的季节 MAD 的结果更有代表性。

结合表 1、2 可以得出,MRE 随海拔的增加而增加,但相关性不显著,原因可能是本文研究的 5 个站点海拔差距不明显。各站 MAD、RMSE 和 MRE 在 UTC12 时刻明显高于 UTC0 时刻,5—9 月 UTC0 时刻和 UTC12 时刻的 MAD 和 RMSE 值相对于其他几个月份更大。综上所述,各月份 UTC0 时刻 GPS 探测的 T_{PWV} 精度优于 UTC12 时刻,夏季探测精度低而冬季探测精度高。对于 GPS 水汽反演的精度已有很多的研究结果,根据国内的研究资料,GPS-PWV 和 Radio-PWV 的 RMSE 基本在 1~5 mm^[7,23-25]。从表 2 可以看出,本研究 5 个站点的 RMSE 值在 2~3 mm,满足精度要求,能反映该地区接近实际的 T_{PWV} 。因此,GPS 数据可以与探空等数据结合,提高水汽探测的精度和高时空分辨率。

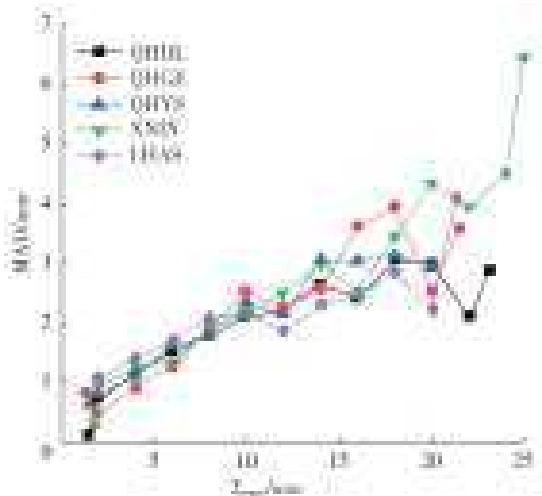
2.3 T_{PWV} 对反演精度的影响

从以上分析可看出, T_{PWV} 对 GPS-PWV 的探测精度有影响,随着 T_{PWV} 的增大,MAD 也逐渐增大。QHDL、QHGE、QHYS、XNIN、LHAS 等站 T_{PWV} 和 MAD 的 r 分别为 0.56、0.57、0.55、0.53 和 0.43,一般来说取绝对值后, r 的值在 0.4~0.6 为中等相关。其中,LHAS 站的相关性较弱, r 为 0.43。图 3

给出了 MAD 随 T_{PWV} 的变化(每隔 5 mm 求一次偏差的平均值),各站随着 T_{PWV} 的增大 MAD 呈现波动上升的趋势,其中,XNIN 站波动上升最为明显(6 mm), T_{PWV} 和 MAD 相关性最强。

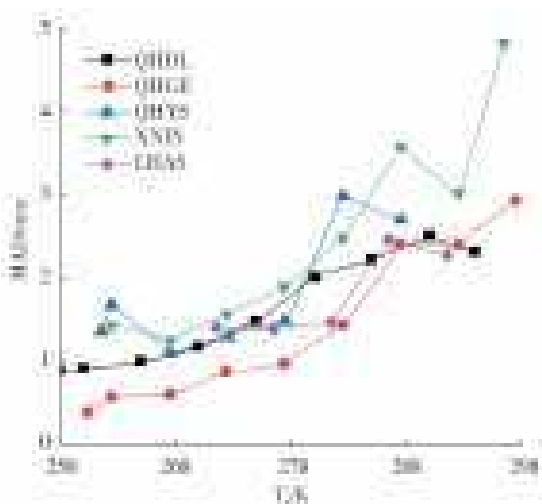
表 3 GPS-PWV 与 Radio-PWV 计算的 T_{PWV} 逐月偏差

站点	月份	UTC0			UTC12		
		MAD/ mm	RMSE/ mm	MRE/ %	MAD/ mm	RMSE/ mm	MRE/ %
QHDL	1	1.06	1.25	59.65	1.19	1.31	59.40
	2	0.93	1.11	41.73	1.64	1.83	70.30
	3	0.81	0.94	25.91	1.58	1.86	58.55
	4	1.38	1.66	26.64	1.97	2.18	47.60
	5	1.31	1.60	21.32	2.16	2.37	47.86
	6	2.17	2.39	17.65	2.86	3.06	26.69
	7	2.81	3.12	17.00	3.03	3.38	21.38
	8	3.69	4.06	24.20	3.63	4.12	30.82
	9	2.70	3.04	25.92	2.98	3.43	27.51
	10	1.90	2.28	38.51	2.53	2.94	52.29
	11	1.34	1.57	52.48	1.60	1.98	66.03
QHGE	1	0.46	0.57	21.12	0.83	0.90	40.57
	2	0.75	1.05	25.64	1.23	1.43	53.73
	3	0.66	0.90	21.44	1.35	1.45	48.32
	4	1.51	1.92	26.15	1.45	1.63	31.32
	5	1.67	2.06	25.47	1.85	2.29	32.13
	6	2.47	2.85	20.24	3.00	3.49	30.41
	7	3.22	4.17	17.84	4.19	4.80	28.14
	8	3.61	4.17	25.08	3.70	4.21	29.95
	9	2.69	3.15	28.38	2.86	3.31	27.34
	10	1.38	1.70	28.24	1.71	2.14	33.52
	11	1.14	1.70	42.41	1.27	1.45	45.99
QHYS	1	0.75	0.80	37.82	1.74	1.94	87.98
	2	0.94	1.07	41.01	1.51	1.73	82.67
	3	0.98	1.06	32.39	1.63	1.86	53.71
	4	1.52	1.86	26.66	1.33	1.84	26.52
	5	2.30	2.57	31.95	2.22	2.50	29.07
	6	2.70	2.94	19.83	3.03	3.27	20.62
	7	3.28	3.70	19.62	3.82	4.22	23.73
	8	3.39	3.73	19.01	4.34	4.62	23.89
	9	2.94	3.41	20.55	4.17	4.41	27.05
	10	2.40	2.60	29.28	2.80	2.98	30.47
	11	1.59	1.72	45.61	1.68	1.83	51.11
XNIN	1	0.82	0.99	30.89	2.28	2.54	98.55
	2	1.26	1.43	39.02	2.07	2.36	64.75
	3	1.56	1.90	32.81	2.51	2.70	61.74
	4	2.01	2.33	23.99	2.52	2.92	40.51
	5	2.72	3.26	27.10	3.43	3.97	42.80
	6	4.51	4.80	27.02	3.24	3.63	24.16
	7	4.85	5.42	22.95	4.68	5.31	22.32
	8	5.05	5.72	21.38	5.34	6.04	25.71
	9	3.30	3.93	18.19	4.01	4.91	23.05
	10	2.21	2.50	20.37	2.98	3.45	29.78
	11	1.33	1.58	37.72	1.62	1.81	46.32
LHAS	1	1.34	1.50	80.67	1.86	1.96	154.34
	2	1.24	1.42	62.12	1.48	1.67	116.20
	3	1.57	1.75	52.74	1.54	1.80	79.02
	4	2.17	2.49	38.17	2.46	2.60	70.12
	5	2.52	2.74	27.88	2.74	3.03	34.96
	6	3.35	3.70	22.23	2.59	3.01	18.00
	7	4.08	4.53	21.45	3.62	3.97	19.81
	8	4.03	4.34	18.9	3.83	4.23	19.76
	9	3.66	3.98	23.00	3.21	3.42	25.61
	10	2.15	2.40	27.41	2.04	2.14	31.64
	11	1.36	1.59	48.72	1.34	1.48	58.57

图3 平均绝对偏差随 T_{PWV} 的变化Fig. 3 The change of mean absolute deviation with T_{PWV}

2.4 T_s 对 T_{PWV} 反演精度的影响

为研究 T_s 对 T_{PWV} 探测精度的影响,计算出 QHDL、QHGE、QHYS、XNIN、LHAS 等站 T_s 和 T_{PWV} 平均绝对偏差的相关系数 r 分别为 0.44、0.49、0.45、0.44 和 0.32,呈现中等相关。图 4 给出了 MAD 随 T_s 的变化(每隔 5 K 或 10 K 求一次偏差的平均值)。可以看出,随着 T_s 的增大,MAD 呈现波动上升的趋势,其中,XNIN 站增加最为明显(5 mm),相关系数相对较高。

图4 平均绝对偏差随 T_s 的变化Fig. 4 Mean absolute deviation changes with T_s

综上所述, T_{PWV} 和 T_s 都对 GPS 探测 PWV 的精度有一定影响,因此,在青藏高原地区应用 GPS 探测数据时要考虑 T_{PWV} 和 T_s 带来的误差。此外,5 个站点中 XNIN 站和 QHGE 站与邻近探空站相关系数较低, RMSE 较大,精度相对较差且受 T_{PWV} 和 T_s 影响最大,初步考虑可能是探空站点距离 GPS 站点相对较远导致误差大。

3 结论

利用中国构造环境监测网络提供的 GPS 数据

和怀俄明大学提供的同时段探空数据,考虑青藏高原不同海拔和气象条件,分析验证了青藏高原典型地区 GPS 反演 PWV 的精度及影响因素,研究结果如下:

(1)各站点 RMSE 值在 2~3 mm, r 值为 0.88~0.93,相关性较高,满足精度要求,表明 GPS 数据能反映青藏高原地区实际的 PWV,可以利用 GPS 信号反演青藏高原地区的水汽信息,通过与探空数据等结合获得更高精度、高时空分辨率的 PWV,可弥补现有高原地区探空站点的不足。

(2)各站点 UTC0 时刻的 PWV 探测精度整体优于 UTC12 时刻;冬季探测精度高, RMSE 基本稳定在 1.1 mm 左右;8 月份误差最大。分析发现地表温度和 PWV 的变化对 GPS 探测 PWV 的精度有一定的影响。

参考文献(References):

- [1] BEVIS M, BUSINGER S, HERRING T A, et al. GPS meteorology: Remote sensing of atmospheric water vapor using the global positioning system[J]. Journal of Geophysical Research, 1992, 97(D14): 15787-15801.
- [2] ASKNE J, NORDIUS H. Estimation of tropospheric delay for microwaves from surface weather data[J]. Radio Science, 1987, 22(3): 379-386.
- [3] ROCKEN C, HOVE T V, JOHNSON J, et al. GPS/STROM-GPS sensing of atmospheric water vapor for meteorology[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 1995, 12(3): 468-478.
- [4] NIELL A E, COSTER A J, SOLHEIM F S, et al. Comparison of measurements of atmospheric wet delay by radiosonde, water vapor radiometer, GPS, and VLBI [J]. Atmos. Oceanic Technol, 2001, 18(6): 830-850.
- [5] 王小亚,朱文耀,严豪健,等. 地面 GPS 探测大气可降水量的初步结果[J]. 大气科学, 1999, 23(5): 605-612. (WANG X Y, ZHU W Y, YAN H J, et al. Preliminary results of ground-based GPS detection of atmospheric precipitation[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 1999, 23(5): 605-612. (in Chinese)) DOI: 10.3878/j. issn. 1006-9895. 1999. 05. 11.
- [6] 李成才,毛节泰,李建国,等. 全球定位系统遥感水汽总量[J]. 科学通报, 1999, 44(3): 333-336 (LI C C, MAO J T, LI J G, et al. Sensing water vapor amount using global positioning system [J]. China Science Bulletin, 1999, 44(3): 333-336. (in Chinese))
- [7] 马学谦,张小军,马玉岩,等. 三江源及其周边地区多源水汽资料对比检验[J]. 高原气象, 2019, 38(1): 78-87. (MA X Q, ZHANG X J, MA Y Y, et al. Comparative test of water vapor data from multiple sources in the

- Three Rivers Source and its surrounding areas [J]. Plateau Meteorology, 2019, 38(1): 78-87. (in Chinese) DOI: 10. 7522/j. issn. 1000-0534. 2018. 00073.
- [8] 王可丽, 江灏, 赵红岩. 西风带与季风对中国西北地区的水汽输送[J]. 水科学进展, 2005, 16(3): 432-438. (WANG K L, JIANG H, ZHAO H Y. Water vapor transport from the westerly zone and monsoon to northwestern China [J]. Advances in Water Science, 2005, 16(3): 432-438. (in Chinese)) DOI: 10. 3321/j. issn: 1001-6791. 2005. 03. 021.
- [9] WANG J H, ZHANG L Y. Systematic errors in global radiosonde precipitable water data from comparisons with ground-based GPS measurements [J]. Journal of Climate, 2008, 21(10): 2218-2238.
- [10] 梁宏, 张人禾, 刘晶森. 青藏高原大气水汽探测误差及其成因[J]. 气象学报, 2012, 70(1): 155-164. (LIANG H, ZHANG R H, LIU J M. Errors in the detection of atmospheric water vapor on the Qinghai-Tibet Plateau and their causes [J]. Acta Meteorologica Sinica, 2012, 70(1): 155-164. (in Chinese)) DOI: 10. 11676/qxxb2012. 015.
- [11] 薛骥. 地基 GPS 水汽反演及水汽层析研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2017. (XUE Q. Ground-based GPS water vapor inversion and water vapor tomography research [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2017. (in Chinese))
- [12] 吴建军, 王鑫, 吕达仁, 等. 北京可降水量变化特征的地基 GPS 观测与分析[J]. 南京气象学院学报, 2007, 30(3): 377-382. (WU J J, WANG X, LYU D R, et al. Ground-based GPS observation and analysis of Beijing's precipitation change characteristics [J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology, 2007, 30(3): 377-382. (in Chinese))
- [13] WANG Z, XIN P, LI R, et al. A Method to reduce non-nominal troposphere error [J]. Sensors, 2017, 17(8): 1751. DOI: 10. 3390/s17081751.
- [14] BEVIS M, BUSINGER S, CHISWELL S, et al. GPS meteorology: Mapping zenith wet delays onto precipitable water [J]. Journal of Applied Meteorology, 1994, 33(3): 379-386.
- [15] THAYER G D. An improved equation for the radio refractive index of air [J]. Radio Science, 1974, 9(10): 803-807.
- [16] 乔滇, 魏加华, 袁晓伟, 等. 青海典型地区地基 GPS 大气可降水量反演及精度分析[J]. 应用基础与工程科学学报, 2019, 27(5): 957-970. (QIAO Z, WEI J H, YUAN X W, et al. Ground-based GPS atmospheric precipitable retrieval and accuracy analysis in typical areas of Qinghai [J]. Journal of Applied Basic Science and Engineering, 2019, 27(5): 957-970. (in Chinese)) DOI: 10. 16058/j. issn. 1005-0930. 2019. 05. 002.
- [17] DAVIS J L, HERRING T A, SHAPIRO I I, et al. Geodesy by radio interferometry: Effects of atmospheric modeling errors on estimates of baseline length [J]. Radio Science, 1985, 20(6): 1593-1607.
- [18] SAASTAMOINEN J H. Atmospheric Correction for the Troposphere and Stratosphere in Radio Ranging Satellites [M]. The Use of Artificial Satellites for Geodesy. Washington DC: American Geophysical Union, 1972.
- [19] BRENOT H, DUCROCA V, WALPERSDORF A, et al. GPS zenith delay sensitivity evaluated from high-resolution numerical weather prediction simulations of the 8-9 September 2002 flash flood over southeastern France [J]. Geophys Res, 2006, 111(D15): 15105. DOI: 10. 1029/2004JD005726
- [20] 姚宜斌, 张豹, 许超铃, 等. T_m-T_s 的相关性分析及全球纬度相关的线性关系模型构建 [J]. 科学通报, 2014, 59(9): 816-824. (YAO Y B, ZHANG B, XU C Q, et al. Correlation analysis of T_m-T_s and construction of global latitude-dependent linear relationship model [J]. Chinese Science Bulletin, 2014, 59(9): 816-824. (in Chinese)) DOI: 10. 1007/s11434-014-0275-9.
- [21] EASTERLING D R, PETERSON T C. A new method for detecting undocumented discontinuities in climatological time series [J]. International Journal of Climatology, 1995, 15(4): 369-377.
- [22] LIU Z Z, WONG M S, NICHOL J, et al. A multi-sensor study of water vapour from radiosonde, MODIS and AERONET: A case study of Hong Kong [J]. International Journal of Climatology, 2013, 33(1): 109-120. DOI: 10. 1002/joc. 3412.
- [23] 马思琪, 周顺武, 王毅勇, 等. JICA 项目地基 GPS 大气可降水量资料精度检验 [J]. 干旱区研究, 2017, 34(3): 575-584. (MA S Q, ZHOU S W, WANG Y Y, et al. Accuracy verification of ground-based GPS atmospheric precipitation data for JICA project [J]. Arid Zone Research, 2017, 34(3): 575-584. (in Chinese)) DOI: 10. 13866/j. azr. 2017. 03. 13.
- [24] 胡娟, 李伟, 曹云昌. 地基 GPS 与常规探空所测可降水量的比对分析 [J]. 气象水文海洋仪器, 2013, 30(1): 45-48, 52. (HU H, LI W, CAO Y C. Comparative analysis of ground-based GPS and conventional radiosonde to measure the amount of precipitation [J]. Meteorological, Hydrological and Oceanographic Instruments, 2013, 30(1): 45-48, 52. (in Chinese)) DOI: 10. 19441/j. cnki. issn1006-009x. 2013. 01. 012.

[25] 宾振,吴瑶,邱璐,等. 江西地基 GPS 遥感大气可降水量变化特征及精度[J]. 高原气象, 2013, 32(5): 1503-1509. (BIN Z, WU Y, QIU L, et al. The variation characteristics and accuracy of atmospheric pre-

cipitation in Jiangxi ground-based GPS remote sensing [J]. Plateau Meteorology, 2013, 32(5): 1503-1509. in Chinese)) DOI: 10. 7522/j. issn. 1000-0534. 2012. 00140.

Verification of retrieval accuracy of PWV based on ground-based GPS signal

CAO Shoukai¹, WEI Jiahua^{1,2,3}, QIAO Zhen^{1,2}, ZHU Xiaomei^{1,2}, BAI Wenwen^{1,2}

(1. School of Water Resources and Electric Engineering, Qinghai University, Xining 810016, China;

2. State Key Laboratory of Plateau Ecology and Agriculture, Qinghai University, Xining 810016, China;

3. State Key Laboratory of Hydrosience and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Precipitable water vapor (PWV) is an important parameter for the study of regional water vapor distribution and formation mechanism of precipitation, which is a quantified indicator to describe water vapor. In Qinghai-Tibet Plateau, the PWV is hard to be acquired for the low spatial and temporal resolution of water vapor detection due to the large variation in altitude as well as the scarcity and uneven distribution of surface radiosonde stations. While the water vapor data with high precision and high spatiotemporal resolution is the premise to improve accuracy of regional precipitation prediction, herewith the PWV with high precision is needed. Water vapor detection by ground-based Global Positioning System (GPS) is an effective supplement to radiosonde. To analyze the accuracy and influencing factors of PWV detected by GPS, 5 typical GPS and radiosonde stations were selected in Qinghai-Tibet Plateau as the source of the data for further research.

GPS data of the Chinese constructed environmental monitoring network, and sounding data of the website of Wyoming University (<http://weather.uwyo.edu/wyoming/>) were applied. The international high-precision GPS data processing software GAMIT based on the double difference method has been used to calculate the total zenith delay, which contributes to the obtainment of the millimeter scale zenith wet delay. And then the PWV in zenith direction is accordingly gained by the proportional relationship between zenith wet delay and PWV. The GPT2 tropospheric delay model is utilized for the calculation with cut-off height angle setting at 10 degrees. In order to eliminate the systematic error caused by correlation, 3 IGS reference stations with a distance of more than 500 km from the point to be measured are introduced. Retrieval calculation is an integration of total zenith delay calculation, tropospheric delay calculation as well as PWV calculation. The GPS retrieval accuracy evaluated and verified by the near radiosonde data (approximate true value) is used to the analysis on the daily and monthly accuracy of PWV measured by GPS as well as on the impact of the retrieval accuracy exerted by PWV and surface temperature.

The results show that the daily variation of PWV retrieved by GPS is consistent with radiosonde data with the correlation coefficients from 0.87 to 0.93. The RMSE and ARE of each station at UTC0 are less than UTC12, and the correlation coefficient at UTC0 time is higher than the value at UTC12 time. By analyzing the monthly deviation of the stations, it is found that the MAE from June to September is relatively large, about 2.0-5.5 mm; the value in November, January and February is relatively small, about 0.5~2.0 mm. Among the 5 stations, XNIN Station has the largest MAD, while QHDL Station and QHGE Station are relatively stable. The RMSE and MAD of all stations have the same trend. The RMSE of all stations reaches the maximum in August, and the value of XNIN Station is the largest, which is 5.05 mm at UTC0 and 6.04 mm at UTC12, respectively. The minimum value of RMSE appears in January or February, which area about 1.1 mm for each station. The MAD, RMSE, and ARE at UTC12 are significantly higher than those at UTC0, and the MAD and RMSE at UTC0 and UTC12 from May to September are larger than those in other months. In addition, the influence of PWV and surface temperature was analyzed on the accuracy of PWV retrieval. It is found that the PWV and the MAD, the ground temperature and the MAD all have a moderate correlation. Apparently, both the PWV and the surface temperature have a certain effect on the accuracy of GPS detection of PWV.

In conclusion, the detection accuracy of each GPS station is equivalent to that of nearby radiosonde stations with RMSE of 2~3 mm and the correlation coefficient of 0.88~0.93, which satisfies the accuracy requirements. In this circumstance, the retrieval results can be put into use on the study of PWV on representative areas. In the future, the research on water vapor retrieval may dependent on the information combined radiosonde with GPS, and thus provides data support on water vapor conditions and precipitation forecasts in Qinghai-Tibet Plateau. Based on PWV retrieval of GPS, the detection accuracy at UTC0 is more exquisite than that at UTC12, and more exquisite in winter than in summer. It is found that PWV detected by GPS is susceptible to the change of surface temperature and PWV. Hence, the errors caused by the variation should be considered on the application of GPS detection data in Qinghai-Tibet Plateau.

Key words: precipitable water vapor; ground-based global positioning system; sounding data; surface temperature; detection accuracy