doi:10.11676/qxxb2018.055 气象学报

青藏高原大气可降水量单站观测对比分析*

胡 姮[1] 曹云昌[1] 尹 聪[2] 段晓梅[3]
HU Heng[1] CAO Yunchang[1] YIN Cong[2] DUAN Xiaomei[3]

1. 中国气象局气象探测中心,北京,100081
2. 南京信息工程大学,南京,210044
3. 成都信息工程大学,成都,610225
1. *Meteorological Observation Centre*, *CMA*, *Beijing* 100081, *China*
2. *Nanjing University of Information Science & Technology*, *Nanjing* 210044, *China*
3. *Chengdu University of Information Technology*, *Chengdu* 610225, *China*
2018-03-08 收稿,2018-07-30 改回.

胡姮,曹云昌,尹聪,段晓梅. 2018. 青藏高原大气可降水量单站观测对比分析. 气象学报, 76(6):1029-1039
Hu Heng, Cao Yunchang, Yin Cong, Duan Xiaomei. 2018. A comparative analysis of precipitable water vapor in the Tibetan Plateau. *Acta Meteorologica Sinica*, 76(6):1029-1039

Abstract In order to investigate the reliability of the observation of precipitable water vapor in the Tibetan Plateau, this article compares and analyzes five different observations collected at Naqu, Gaize and Shenzha from June to September 2015. Observations include the GNSS PW, the radiosonde PW, the FY-3 visible infrared scanning radiometer sensing data (FY-3 PW), the MODIS remote sensing data and the NCEP gridded reanalysis data (NCEP PW). The result shows that the radiosonde PW and the GNSS PW are closed with the differences less than 2.5 mm. FY-3 PW is significantly drier than the other observations, and the biases are larger than 6 mm. The degree of dispersion for precipitable water vapor observed by the automatic sounding systems at Gaize and Shenzha stations is obviously larger than that by the L-band electron radiosonde at Naqu Station, and the RMSE is larger than 4 mm.
Key words Tibetan Plateau, Precipitable water vapor, Ground-based GNSS, Radiosonde, Satellite products, Comparative analysis

摘 要 为了探讨青藏高原大气可降水量观测资料的可靠性,对 2015 年 6—9 月西藏申扎、改则和那曲 3 站地基 GNSS 遥感的大气可降水量、同址探空观测的大气可降水量、风云三号可见光红外扫描辐射计反演的晴空大气可降水量、MODIS 大气可降水量和 NCEP 可降水量进行对比分析。结果表明:探空可降水量和地基 GNSS 可降水量的偏差较小,均低于 2.5 mm。风云三号可降水量明显偏低,与其他观测结果的偏差超过 6 mm。全自动探空可降水量离散程度较 L 波段探空大,均方根误差超过 4 mm。
关键词 青藏高原, 大气可降水量, 地基 GNSS, 探空, 卫星产品, 对比分析
中图法分类号 P413

1 引 言

水汽是大气温室效应的因素之一,也是大气的重要组成成分。水汽变化对水循环、气溶胶成分以及云的形成有重要的影响(Gui, et al, 2017)。水汽驱动着天气和气候的变化,也是局地强对流天气系

* 资助课题:第三次青藏高原大气科学试验——边界层与对流层观测(GYHY201406001)、公益性行业(气象)科研专项(GYHY201406012)。
作者简介:胡姮,主要从事地基导航卫星遥感水汽技术研究。E-mail: huheng83@163.com

统形成和演变的重要因子。准确的大气水汽观测对降水预报、遥感大气校正以及水循环和全球气候变化研究起重要的作用(李红林等,2008;李国平等,2010;梁宏等,2012)。青藏高原的特殊大地形动力和热力作用对亚洲以及全球大气水循环及全球气候和环境有重要影响(吴国雄等,2004;梁宏等,2006;施小英等,2008;傅慎明等,2011;徐祥德等,2014,2015;夏昕等,2016)。基于青藏高原在亚洲夏季风系统大气水分循环过程中的重要地位,青藏高原水汽资源的来源、分布和观测准确性一直是人们关注的重大问题。

相关研究(郝民等,2015;Liu,et al,2005)表明,青藏高原无线电探空探测的可降水量(RS PW)存在明显"干偏差"。从 2002 年 1 月开始中国推广使用国产 L 波段电子探空仪(GTS-1),以替代 59 型探空仪。GTS-1 与维萨拉-RS80 探空仪的测量精度相当,达到了目前国际先进水平(邢毅等,2009;李伟等,2009)。地基 GNSS/MET 是近年来比较成熟应用的水汽监测方法,具有时间分辨率高、精度高、性能可靠、维护简单等优点,利用其反演的可降水量(GNSS PW)信息可以分析水汽细致的演变过程,发现一些新的规律(张俊东等,2013;Wang,et al,2017;Manandhar,et al,2017)。Liu 等(2005)比较了高原那曲站微波辐射计(WVR)、RS PW 和 GNSS PW,表明 GNSS PW 与 WVR 探测结果比较接近,而 RS PW 与 WVR 探测的一致性相对较差。由于具有时间序列较均匀和精度较高等特点,GNSS PW 已被广泛应用于验证卫星遥感、探空以及数值模式输出等结果(Liu,et al,2005;Bock,et al,2007;Wang,et al,2008)。同时,利用 MODIS、风云气象卫星遥感可获得大尺度的大气可降水量数据,其反演方法主要分为热红外方法、微波方法和近红外方法(张俊东等,2013;Gurbuz,et al,2017),其中近红外方法(Frouin,et al,1990)即利用太阳反射光为辐射源,通过近红外区中一个弱吸收区、一个窗区两个通道来反演大气水汽含量,该方法在 MODIS、FY、MERIS 等多种卫星仪器中得到应用(李红林等,2008)。利用 MODIS 近红外通道可以反演高空间分辨率的大气可降水量(MODIS PW)(刘玉洁等,2001),详细地反映大气水汽含量的空间分布及变化,但由于受传感器定标、地表反射率、气溶胶以及大气温、湿度廓线等因素影响,MODIS 近红外水汽反演存在一定的系统性误差(Gao,et al,2003,2011)。NCEP 再分析资料是美国国家环境预测中心(NCEP)和国家大气研究中心(NCAR)的合作项目,收集的资料包括:飞机观测资料、陆面天气观测资料、全球无线电测风资料、综合海洋资料(COADS)、卫星观测资料、卫星云导风资料以及微波特殊观测/图像(SSM/I)资料等。NCEP 已对 1949 年以来的资料进行同化,可以获得高空间分辨率的大气可降水量资料(徐影等,2001)。根据相关研究(赵瑞霞等,2007),NCEP 可降水量(NCEP PW)与其本身量值相比,年际变化幅度很小,不论是全年平均还是分季节,均与实测有很好的一致性,可用于可降水量年际变化的研究。本研究综合利用 2015 年 6—9 月西藏那曲、申扎和改则 3 个站的地基 GNSS/MET 观测资料、探空、MODIS 卫星遥感、风云三号卫星遥感和 NCEP 格点再分析资料,初步分析青藏高原的大气可降水量的观测偏差以及相关成因,为提高青藏高原地区卫星反演水汽资料的精度提供参考。

2 资料获取与数据处理

2.1 资料介绍

那曲(31.48°N,92.06°E)、改则(32.3°N,84.06°E)、申扎(30.93°N,88.7°E)3 个地基 GNSS 观测站位于高原中西部,分别与那曲 L 波段业务探空站(海拔 4477 m)、改则自动探空站(海拔 4410 m)、申扎自动探空站(海拔 4651 m)(Zhao,et al,2018)水平距离小于 1 km。根据相关研究(Wang,et al,2008),可以认为探空站和地基 GNSS 站同址,解算的大气水汽含量可以进行对比分析。表 1 给出了 3 个地基 GNSS 观测站的相关观测设备信息。

2.2 数据处理

2.2.1 地基 GNSS 可降水量

GNSS 导航卫星信号通过大气层时其传输路径受到大气介质的折射而弯曲,传输路径比理论的几何距离变长,传播速度也随之变慢,GPS 信号产生相应的延迟。卫星信号的延迟时间对应的距离增加与大气折射率有关,原理和计算方法参见相关文献(李成才等,1998;曹云昌等,2007)。

表1　地基GNSS与探空站的设备信息

Table 1　Equipment information of the GNSS stations and the sounding stations

站名	站号	GNSS站	探空站
那曲	55299	TRIMBLE NETRS	GTS-1(数字式电子探空仪)
改则	55248	TRIMBLE NETRS	全自动探空系统(新型GPS探空仪)
申扎	55472	TRIMBLE NETRS	全自动探空系统(新型GPS探空仪)

获取那曲、改则、申扎3个站地基GNSS遥感观测数据,选取了中国以外的部分跟踪站数据(TSKB、IISC、POL2、GUAM、KIT3)以及IGS(International GPS Service)快速星历,利用GAMIT软件进行解算。GAMIT是由MIT(麻省理工学院)开发的国际上普遍采用的GPS数据处理软件。

将采用的那曲、改则、申扎3个站与IGS参考站组网解算,设置的星历约束参数为0.01,即10^{-8}的相对精度(杨光林等,2002)。解算方式选择LC_HELP,适用于长基线的解算。台站坐标约束以地心为中心的三维站坐标,其纬向、经向、半径3个方向的约束分别为1.00、1.00和2.00 m。跟踪站的坐标约束采用较小的数值,分别为0.05、0.05和0.1 m(Herring,et al,2015)。

天顶延迟取样频率为30 min,每天49个。解算时采用的地面气象资料(温、湿、压)为地基GNSS站所在气象局内地面观测结果,取样频率为10 min。

2.2.2　探空可降水量

获取2015年6—9月那曲业务探空站的L波段探空仪秒数据,改则、申扎站全自动探空系统观测数据,提取其中标准层的气压、温度、露点温度、相对湿度进行计算,原理和计算方法参考《常规高空气象观测业务规范》和《大气科学词典》。

由于全自动探空资料中露点温度有部分缺测,为了保证3个台站探空资料的计算结果有可对比性,所以在计算3个台站RS PW时只采用标准层的观测值。由于高原的海拔高度几乎到了对流层的中部,计算可降水量的探空廓线资料至少要观测至200 hPa,且至少要5个标准层。文中采用的3个站的探空资料中都达到了该要求(梁宏等,2012;郭启云等,2015)。

2.2.3　NCEP可降水量

获取由美国国家环境预报中心(NCEP)和国家大气研究中心(NCAR)联合发布的地面资料,提取其中的整层气柱可降水量,单位为0.1 kg/m^2,资料格距为2.5°×2.5°的经纬网格,网格点数为144×73个格点,资料范围为那曲、改则、申扎3站邻近格点。

2.2.4　MODIS可降水量

文中获取MODIS近红外大气水汽产品MOD05_L2。该产品提供近红外通道的大气可降水量。资料的空间分辨率是1 km×1 km,资料覆盖地区是那曲、改则、申扎3站经纬度0.01°范围之内,卫星经过青藏高原的时间为11时30分—12时30分。由于MODIS在晴空条件下反演结果才反映大气可降水量,在有云区域反演的则是云层以上的水汽含量,因此,对比分析时结合云覆盖信息Cloud_Mask(张俊东等,2013),选取无云概率大于95%的观测量值与GNSS探测结果进行比较。

2.2.5　风云三号可降水量

采用FY-3C上搭载的可见光红外扫描辐射计(VIRR)观测资料,FY-3 PW采用的晴空大气可降水量(TPW)是由VIRR资料和红外分裂窗方法反演获得。VIRR大气可降水产品分为段、日、旬、月产品。段产品为未进行投影处理,星下点分辨率1 km。日、旬、月产品为0.05°分辨率等经纬度投影,全球180°×360°不分幅保存,文中采用日产品,选取资料范围为那曲、改则、申扎3站邻近格点。

3　结果及分析

表2给出了5种观测结果的样本数量,观测时间为2015年6—9月。其中,GNSS PW为每小时1次结果,RS PW为00和12时(世界时)两次结果,NCEP PW为每6 h一个结果,风云三号可降水量(FY-3 PW)为00和12时(世界时)两次结果,MODIS PW为04和15时(世界时)两次结果。在做对比分析时,将GNSS PW、RS PW、NCEP PW、FY-3 PW四种结果进行了时间匹配,基准为探空放球时间。MODIS PW由于卫星过境时间不一致,观测时间只能与GNSS PW进行匹配。

表 2 5 种观测结果的样本数量

Table 2 The number of samples for the five observations

站名	观测时段	样本数				
		GNSS PW	RS PW	NCEP PW	FY-3 PW	MODIS PW
那曲	2015 年 6—9 月	2886	241	483	226	81
改则		2585	275	429	196	73
申扎		2279	250	383	175	70

将 5 种观测结果每 10 d 计算一次平均值,从图 2 可以看出 RS PW 和地基 GNSS PW 结果比较接近,FY-3 PW 明显偏干,并且与其他几种观测结果的时序变化差别较大。将 RS PW 与其他几种观测结果的 10 d 平均值进行偏差分析得到,那曲、改则和申扎站 RS PW 和 GNSS PW 的偏差分别为 −0.74、−0.245 和 1.94 mm。RS PW 和 NCEP PW 的偏差分别为 2.42、2.97 和 3.63 mm,RS PW 和 MODIS PW 偏差分别为 5.79、4.12 和4.97 mm,RS PW 和 FY-3 PW 的偏差分别为 6.39、7.28 和 7.75 mm。从以上几种观测结果的偏差量可以看出,FY-3 PW 观测偏干较多,与探空可降水量的相对偏差分别达到了 62%、71%和 70%,相关较差。

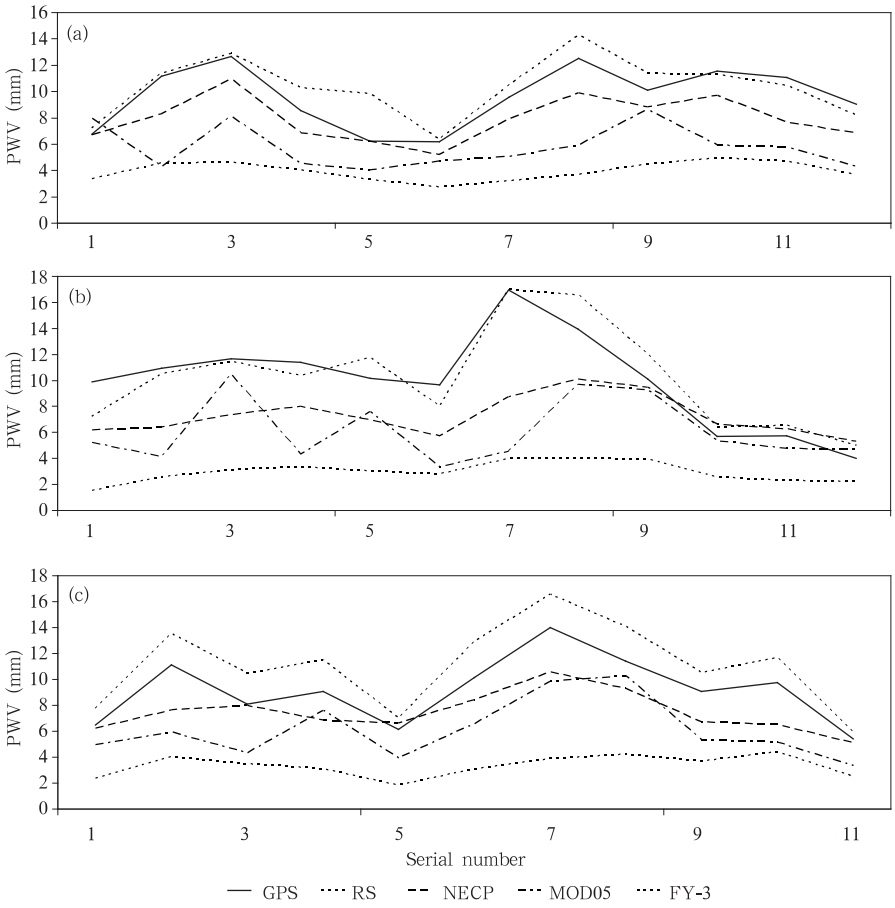


图 1 那曲(a)、改则(b)和申扎(c)站 5 种可降水量观测结果 10 d 平均值对比

Fig. 1 Comparison of 10 d averaged values of five precipitation observations in Naqu (a), Gaize (b) and Shenzha (c)

将 3 个观测站的 FY-3 PW 分别与时间匹配一致的 GNSS PW、RS PW、NCEP PW 3 种观测结果进行对比分析,图 2 中用 F-G、F-R、F-N 分别代表 FY-3 与其他 3 种观测结果的偏差,可以看出偏差都

小于0,说明FY-3 PW明显小于其他观测结果。表3给出了FY-3 PW与其他3种观测结果的偏差和相关系数,可以看出FY-3 PW与GNSS PW、RS PW、NCEP PW的偏差都在4—5 mm以上,相关系数均小于0.70,说明获取的观测时段中FY-3 PW与其他的观测结果差别较大。

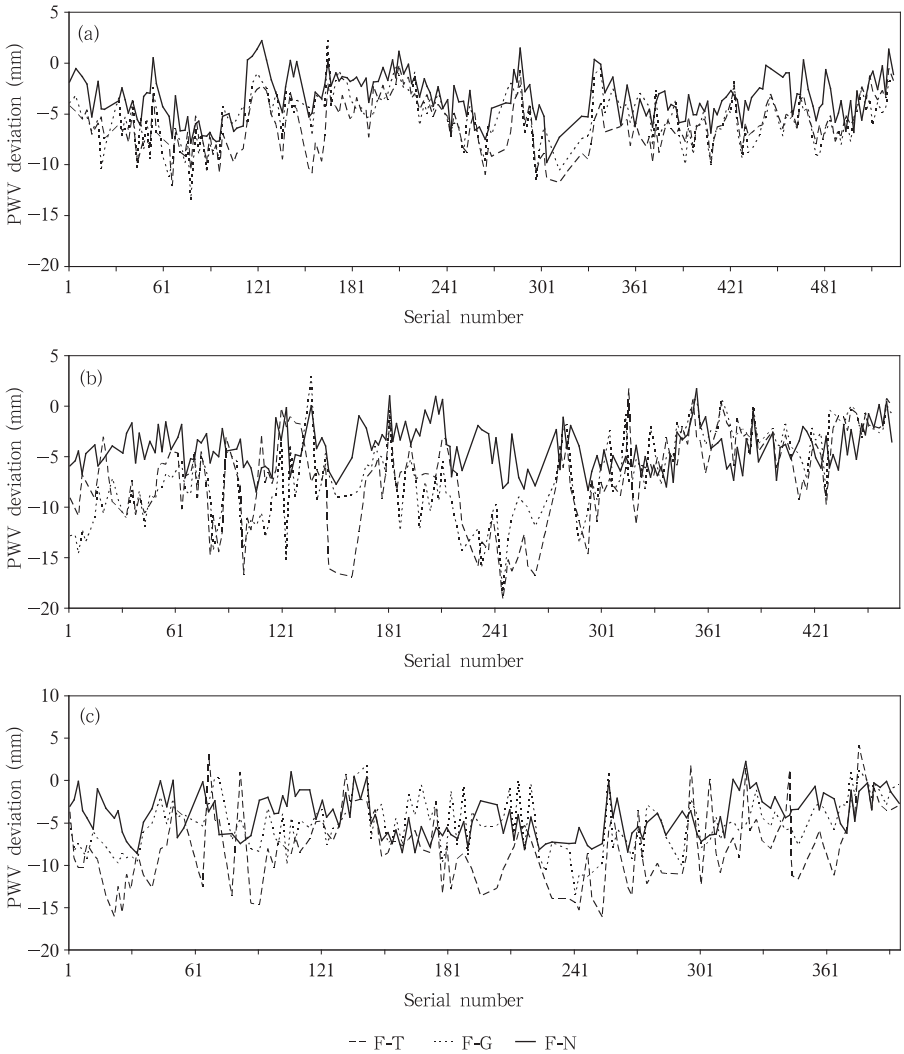


图2　那曲(a)、改则(b)和申扎(c)站风云三号可降水量与其他观测结果的偏差情况

Fig. 2　Deviations between FY-3 PW and other observations in Naqu (a), Gaize (b) and Shenzha (c)

表3　风云三号可降水量与其他观测结果的对比

Table 3　Comparison between FY-3 PW and other observations

站名	GNSS PW			RS PW			NCEP PW		
	偏差(mm)	相关系数	均方根误差(mm)	偏差(mm)	相关系数	均方根误差(mm)	偏差(mm)	相关系数	均方根误差(mm)
那曲	-5.48	0.63	3.82	-6.04	0.67	4.06	-3.42	0.65	3.06
改则	-6.66	0.48	5.02	-6.78	0.63	5.54	-4.12	0.44	2.95
申扎	-5.22	0.49	5.59	-7.63	0.51	5.59	-4.17	0.37	2.93

将时、空匹配一致的 RS PW 与 GNSS PW、NCEP PW 进行对比和分析,表 4 以 RS PW 作为参照,分别给出了 GNSS PW、NCEP PW 相对于 RS PW 的相关系数、均方根误差以及偏差。

从表 4 中可以看出,3 个站的 RS PW 和 GNSS PW 的相关系数分别是 0.83、0.76、0.66,RS PW 和 NCEP PW 的相关系数分别为 0.83、0.62、0.53,说明 RS PW 和 GNSS PW 的相关更强。图 3 还给出了那曲、改则、申扎 3 站 RS PW 分别与 GNSS PW 以及NCEP PW的偏差,分别用R-G和R-N代表。

表 4 那曲、改则、申扎站探空的可降水与地基 GNSS、NCEP 可降水的对比

Table 4 Comparisonsof the RS PW withthe GNSS PW and the NCEP PW

站名	相关系数 (GNSS)	相关系数 (NCEP)	均方根误差 (GNSS)(mm)	均方根误差 (NCEP)(mm)	偏差 (GNSS)(mm)	偏差 (NCEP)(mm)
那曲	0.83	0.83	3.36	3.17	0.88	2.38
改则	0.76	0.62	4.9	4.1	0.97	3.28
申扎	0.66	0.53	4.35	4.14	2.43	3.72

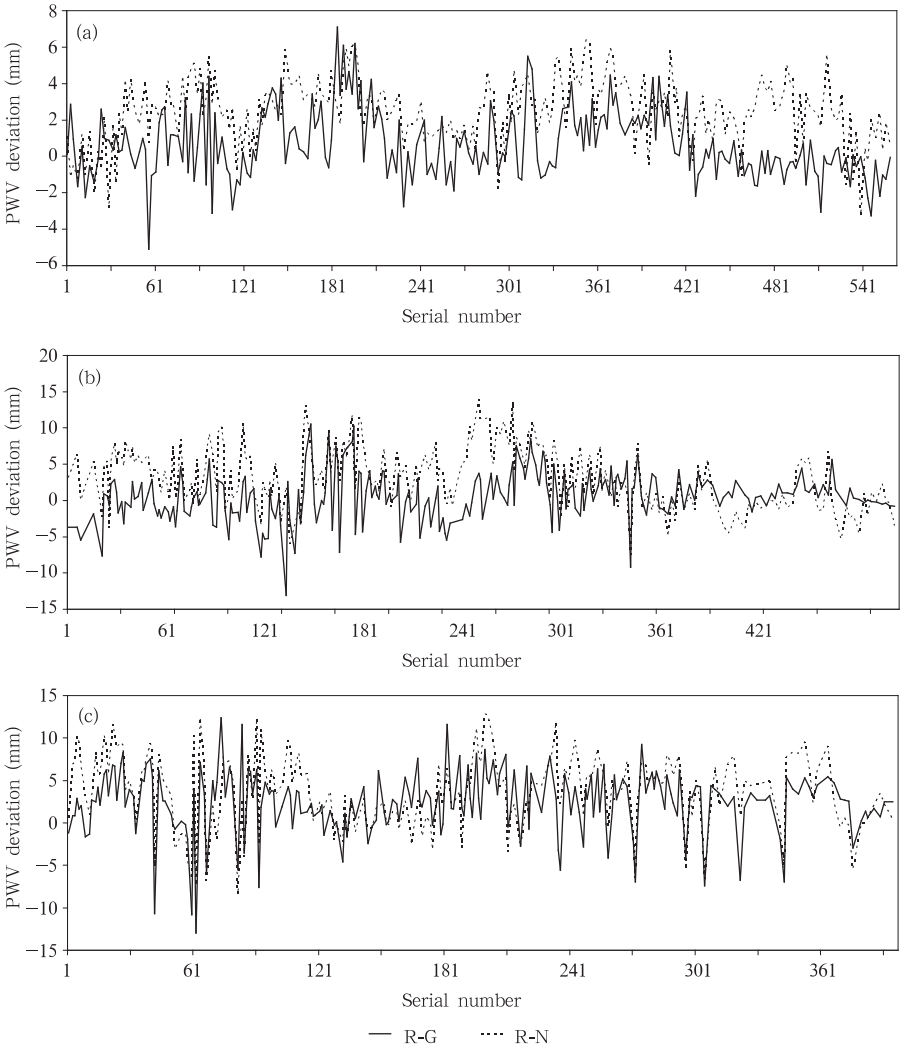


图 3 那曲(a)、改则(b)和申扎(c)3 站 RS PW、GNSS PW 和 NCEP PW 的偏差

Fig. 3 Deviations between the RS PW and the GNSS PW/NCEP PW in Naqu (a), Gaize (b) and Shenzha (c)

可以看出 RS PW 与 NCEP PW 的偏差更大,说明文中选取的 3 个站的观测资料中 RS PW 和 GNSS PW 的观测结果更加接近。表 4 给出了 RS PW 分别与 GNSS PW 和 NCEP PW 的偏差,那曲站分别为 0.88 和 2.38 mm,改则站分别为 0.97 和 3.28 mm,申扎站分别为 2.43 和 3.72 mm,可以看出,NCEP PW 与 RS PW 和 GNSS PW 相比存在偏干情况。

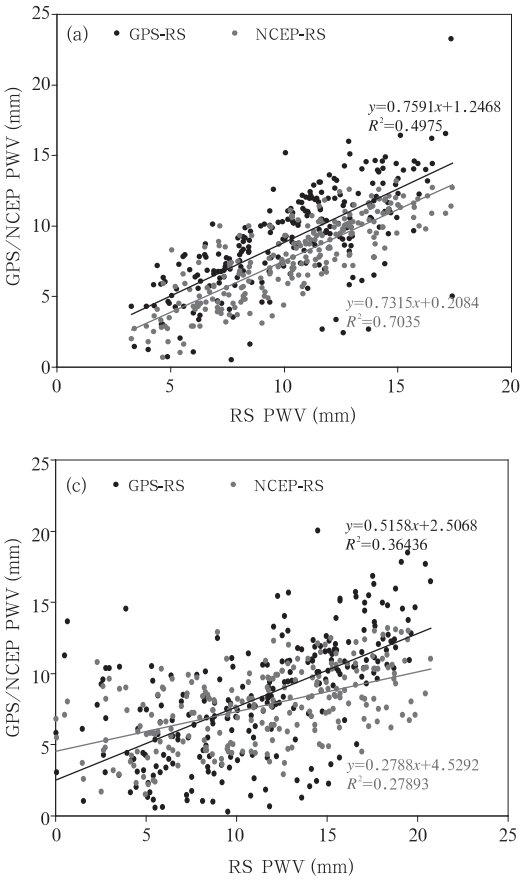
由于 MODIS 观测结果时间为 04 和 15 时(世界时),所以只能与地基 GNSS 观测结果进行时间匹配。表 5 给出了那曲、改则、申扎站 GNSS PW 和 MODIS PW 的对比情况。MODIS PW 和 GNSS PW 的相关以及均方根误差均优于 FY-3 PW 和 GNSS PW 的结果,但是和 GNSS PW 的偏差大于 3 mm,可以看出 MODIS 在青藏高原地区的可降水量观测偏干。由于 NCEP 再分析资料同化了 MODIS 观测资料,可能这是 NCEP PW 在青藏高原地区观测偏干的原因。

图 4 给出了 RS PW、GNSS PW 和 NCEP PW 3 种观测结果的散点分布,可以看出改则和申扎 RS PW 的离散性较大。表 4 给出了那曲、改则、申扎 3 站 RS PW 分别与 GNSS PW 以及 NCEP PW 的相关系数。其中那曲站 RS PW 分别与 GNSS PW 以及 NCEP PW 的相关系数都是 0.83,改则站分别是 0.76 和 0.62,申扎站分别是 0.66 和 0.53,说明那曲 L 波段 RS PW 与 GNSS PW 结果相关较强。另外,表中给出了那曲、改则、申扎 3 站 RS PW 分别与 GNSS PW 以及 NCEP PW 的均方根误差(RMSE),那曲站分别是 3.36 和 3.17 mm,改则站分别是 4.9 和 4.1 mm,申扎站分别是 4.35 和 4.14 mm,说明改则和申扎站的 RS PW 与 GNSS PW 以及 NCEP PW 的符合度低于那曲站。全自动

表 5　那曲、改则、申扎站 GNSS PW 与 MODIS PW 对比结果

Table 5　Comparison between the GNSS PW and the MODIS PW

站名	相关系数	均方根误差(mm)	偏差(mm)
那曲	0.56	3.56	3.96
改则	0.47	4.7	3.98
申扎	0.61	3.85	3.46



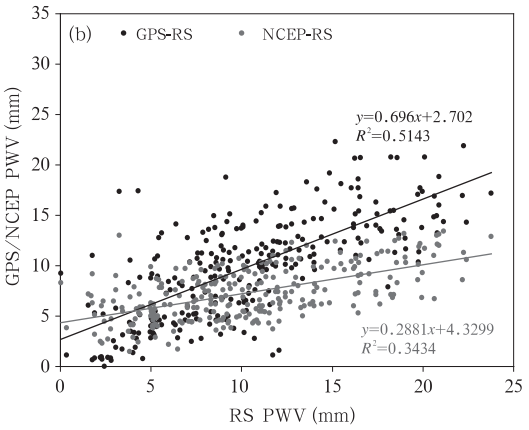


图 4　那曲(a)、改则(b)、申扎(c) 3 站 RS PW、GNSS PW 以及 NCEP PW 散点分布

Fig. 4　Scatter diagram of the RS PW/GNSS PW/NCEP PW in Naqu (a), Gaize (b) and Shenzha (c)

探空与其他观测结果的均方根误差较大,初步分析是因为观测资料里的标准层有部分缺测,虽然保证观测结果达到 200 hPa,但是观测的标准层数量相比 L 波段探空资料少。因此,计算出来的可降水量存在一定的误差,离散性也较大。

通过引用正态分布以及 3σ 的原理来描述 3 个站的地基 GNSS 观测数据质量情况。ZTD-σ 值是天顶总延迟的解算精度因子,数值不大于 3σ 值。数据的质量特性值分布为

$$F(x)=\int_{-\infty}^{x} f(x)\mathrm{d}x=\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma}\int_{-\infty}^{x} \mathrm{e}^{\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}\mathrm{d}x \quad (1)$$

式中,μ 为正态均值,描述质量特性值分布的集中位置。σ 为标准差,描述质量特性值 x 分布的离散程度。天顶总延迟 ZTD 服从正态分布,在 $\pm 3\sigma$ 范围内包含了 99.73%的质量特性值。图 5 是将那曲、改则和申扎 3 个台站地基 GNSS 观测数据解算的天顶总延迟的 σ 值分布,改则和申扎站的 ZTD-σ 线性拟合值比那曲站大,那曲、改则和申扎 3 个站的 ZTD-σ 均值分别为 9.27、12.96、10.47 mm,那曲站的 ZTD-σ 相对较小。将 3 个站的 ZTD-σ 的分布进行对比,从图 6 可以看出,那曲站的值主要集中在 10 mm 以下,改则和申扎站的值主要集中在 8—16 mm。根据以上分析,那曲站的 GNSS PW 的内符合精度比改则和申扎站高,观测数据质量较好,这可能是造成改则和申扎站 GNSS PW 与 RS PW 相关性相对较差的原因之一。

将 3 个站的 GNSS PW 进行对比(图 7),可以看出,改则和申扎站的 GNSS PW 变化幅度较大,那曲站 GNSS PW 变化较平缓,推测地形或气候原因可能是改则和申扎站可降水量离散性较大的原因之一,这一特征尚需进一步积累样本进行研究。

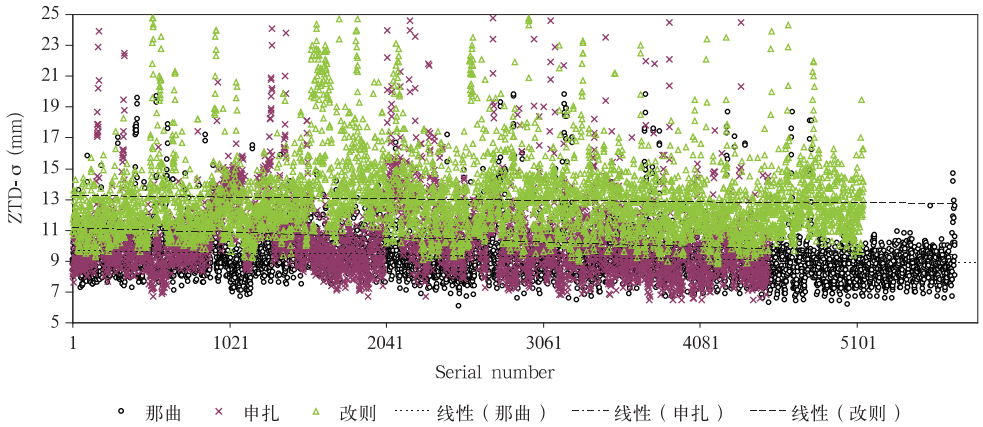


图 5 那曲、改则、申扎站的 ZTD-σ 对比及其线性拟合

Fig. 5 Contrast of ZTD-σ and its linear fittings in Naqu, Gaize and Shenzha

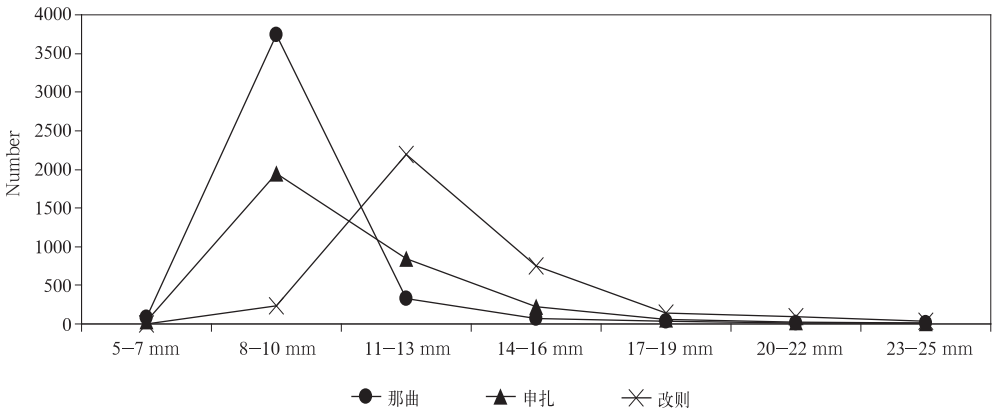


图 6 那曲、改则、申扎站的 ZTD-σ 分布

Fig. 6 Distributions of ZTD-σ in Naqu, Gaize and Shenzha

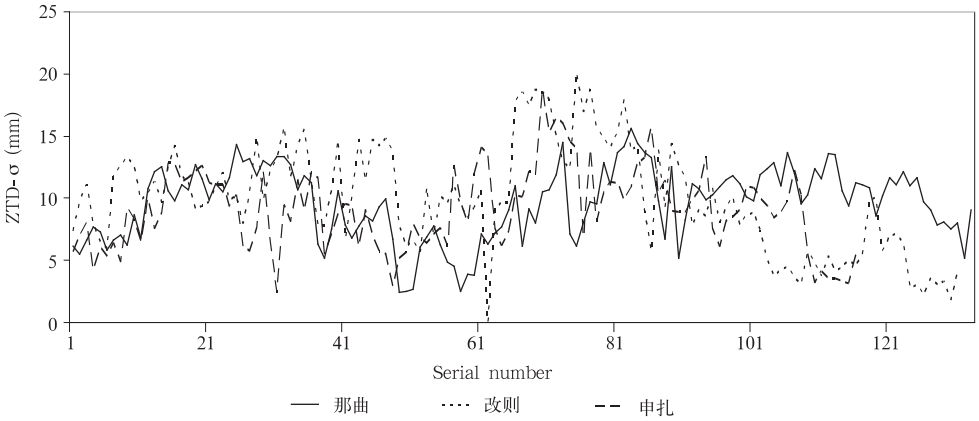


图 7　那曲、改则、申扎 3 站 GNSS PW 对比

Fig. 7　Comparison of the GNSS PW in Naqu, Gaize and Shenzha

4　结论与讨论

(1) 用于青藏高原大气可降水量的观测方法目前主要有地基 GNSS、探空、NCEP 再分析、MODIS 星载传感器、风云三号可见光红外扫描辐射计等。RS PW 和 GNSS PW 相关较强,两种观测结果的偏差较小,3 个站均小于 2.5 mm。FY-3 的可降水量结果明显偏干,其算法需进一步验证。MODIS PW 比 GNSS PW 偏干 3—4 mm,由于 NCEP 资料是融合了 MODIS 的观测资料,因此这可能是造成 NCEP PW 在青藏高原偏干的原因。

(2) 改则和申扎站全自动探空系统反演的可降水量结果离散程度相比那曲 L 波段业务探空系统偏大,这可能与全自动探空湿度观测结果标准层部分缺测、计算可降水量时做了平滑处理有关。

(3) 改则和申扎站的 GNSS PW 和 RS PW 观测结果偏差较大,可能与两个站的地基 GNSS 的 ZTD 解算精度相对偏低有关,该解算精度受当地设备供电、环境、地形或气候系统的影响,此特征需要进一步研究论证。

参考文献

曹云昌,方宗义,夏青. 2007. 地基 GPS 气象站网建设指南. 北京:气象出版社,7-9. Cao Y C, Fang Z Y, Xia Q. 2007. Ground-Based GPS Weather Station Network Construction Guide. Beijing: China Meteorological Press, 7-9 (in Chinese)

傅慎明,孙建华,赵思雄等. 2011. 梅雨期青藏高原东移对流系统影响江淮流域降水的研究. 气象学报,69(4):581-600. Fu S M, Sun J H, Zhao S X, et al. 2011. A study of the impacts of the eastward propagation of convective cloud systems over the Tibetan Plateau on the rainfall of the Yangtze Huai River basin. Acta Meteor Sinica, 69(4): 581-600 (in Chinese)

郭启云,李峰,郭凯等. 2015. 自动探空系统性能试验与评估. 电子测量技术,38(2):10-15. Guo Q Y, Li F, Guo K, et al. 2015. The evaluation of test and the performance of automatic sounding system. Electron Meas Technol, 38(2): 10-15 (in Chinese)

郝民,龚建东,王瑞文等. 2015. 中国 L 波段探空湿度观测资料的质量评估及偏差订正. 气象学报,73(1):187-199. Hao M, Gong J D, Wang R W, et al. 2015. The quality assessment and correction of the radiosonde humidity data biases of L-band in China. Acta Meteor Sinica, 73(1): 187-199 (in Chinese)

李成才,毛节泰. 1998. GPS 地基遥感大气水汽总量分析. 应用气象学报,9(4):470-477. Li C C, Mao J T. 1998. Analysis for remote sensing of atmospheric precipitable water using ground based GPS receiver. Quart J Appl Meteor, 9(4): 470-477 (in Chinese)

李国平,黄丁发,郭洁等. 2010. 地基 GPS 气象学. 北京:科学出版社,89-92. Li G P, Huang D F, Guo J, et al. 2010. Ground-Based GPS Meteorology. Beijing: Science Press, 89-92 (in Chinese)

李红林,李万彪. 2008. MODIS 近红外资料反演大气水汽总含量. 北京大学学报(自然科学版),44(1):121-128. Li H L, Li W B, 2008. Retrieval of atmospheric total water vapor with MODIS near infrared measurements. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 44(1): 121-128 (in Chinese)

李伟,李峰,赵志强等. 2009. L 波段气象探测系统建设技术评估报告. 北京:气象出版社,15-17. Li W, Li F, Zhao Z Q, et al. 2009. L-band Meteorological Detection System Construction Technology Assessment Report. Beijing: China Meteorological Press, 15-17 (in Chinese)

梁宏，刘晶淼，李世奎. 2006. 青藏高原及周边地区大气水汽资源分布和季节变化特征分析. 自然资源学报，21(4)：526-534. Liang H，Liu J M，Li S K. 2006. Analysis of precipitable water vapor source distribution and its seasonal variation characteristics over Tibetan Plateau and its surroundings. J Nat Resour，21(4)：526-534 (in Chinese)

梁宏，张人禾，刘晶淼等. 2012. 青藏高原探空大气水汽偏差及订正方法研究. 大气科学，36(4)：795-810. Liang H，Zhang R H，Liu J M，et al. 2012. Systematic errors and their calibrations for radiosonde precipitable water vapor on the Tibetan Plateau. Chinese J Atmos Sci，36(4)：795-810 (in Chinese)

刘玉洁，杨忠东. 2001. MODIS 遥感信息处理原理与算法. 北京：科学出版社，1-16，66-74. Liu Y J，Yang Z D. 2001. Principle and Algorithm of MODIS Remote Sensing Information Processing. Beijing：Science Press，1-16，66-74 (in Chinese)

施小英，施晓辉. 2008. 夏季青藏高原东南部水汽收支气候特征及其影响. 应用气象学报，19(1)：41-46. Shi X Y，Shi X H. 2008. Climatological characteristics of summertime moisture budget over the southeast part of Tibetan Plateau with their impacts. J Appl Meteor Sci，19(1)：41-46 (in Chinese)

吴国雄，毛江玉，段安民等. 2004. 青藏高原影响亚洲夏季气候研究的最新进展. 气象学报，62(5)：528-540. Wu G X，Mao J Y，Duan A M，et al. 2012. Recent progress in the study on the impacts of Tibetan Plateau on Asian summer climate. Acta Meteor Sinica，62(5)：528-540 (in Chinese)

夏昕，任荣彩，吴国雄等. 2016. 青藏高原周边对流层顶的时空分布、热力成因及动力效应分析. 气象学报，74(4)：525-541. Xia X，Ren R C，Wu G X，et al. 2016. An analysis on the spatio-temporal variations and dynamic effects of the tropopause and the related stratosphere-troposphere coupling surrounding the Tibetan Plateau area. Acta Meteor Sinica，74(4)：525-541 (in Chinese)

邢毅，张志萍，曹云昌等. 2009. RS92 型 GPS 探空仪的性能试验与分析. 气象科技，37(3)：336-340. Xing Y，Zhang Z P，Cao Y C，et al. 2009. Experiment and analysis of GPS radiosonde RS92 performance. Meteor Sci Technol，37(3)：336-340 (in Chinese)

徐祥德，赵天良，Lu C G 等. 2014. 青藏高原大气水分循环特征. 气象学报，72(6)：1079-1095. Xu X D，Zhao T L，Lu C G，et al. 2014. Characteristics of the water cycle in the atmosphere over the Tibetan Plateau. Acta Meteor Sinica，72(6)：1079-1095 (in Chinese)

徐祥德，赵天良，施晓晖等. 2015. 青藏高原热力强迫对中国东部降水和水汽输送的调制作用. 气象学报，73(1)：20-35. Xu X D，Zhao T L，Shi X H，et al. 2015. A study of the role of the Tibetan Plateau's thermal forcing in modulating rainband and moisture transport in eastern China. Acta Meteor Sinica，73(1)：20-35 (in Chinese)

徐影，丁一汇，赵宗慈. 2001. 美国 NCEP/NCAR 近 50 年全球再分析资料在我国气候变化研究中可信度的初步分析. 应用气象学报，12(3)：337-347. Xu Y，Ding Y H，Zhao Z C. 2001. Confidence analysis of NCEP/NCAR 50-year global reanalyzed data in climate change research in China. Quart J Appl Meteor，12(3)：337-347 (in Chinese)

杨光林，刘晶淼，毛节泰. 2002. 西藏地区水汽 GPS 遥感分析. 气象科技. 30(5)：266-272. Yang G L，Liu J M，Mao J T. 2002. Remote sensing analysis of water vapor GPS in Tibet. Meteor Sci Technolo，30(5)：266-272 (in Chinese)

张俊东，陈秀万，李颖等. 2013. 基于 GPS 数据的 MODIS 近红外水汽改进反演算法研究. 地理与地理信息科学，29(2)：40-44. Zhang J D，Chen X W，Li Y，et al. 2013. Research on improved retrieval algorithm of MODIS near-IR water vapor based on GPS data. Geog Geo-Inf Sci，29(2)：40-44 (in Chinese)

赵瑞霞，吴国雄. 2007. 长江流域水分收支以及再分析资料可用性分析. 气象学报，65(3)：416-427. Zhao R X，Wu G X. 2007. Water budget for the Yangtze River basin and evaluation of ECMWF and NCEP/NCAR reanalysis data. Acta Meteor Sinica，65(3)：416-427 (in Chinese)

Bock O，Guichard F，Janicot S，et al. 2007. Multiscale analysis of precipitable water vapor over Africa from GPS data and ECMWF analyses. J Geophys Res Lett，34(9)：L09705

Frouin R，Deschamps P Y，Lecomte P. 1990. Determination from space of atmospheric total water vapor amounts by differential-absorption near 940 nm：Theory and airborne verification. J Appl Meteor，29(6)：448-460

Gao B C，Kaufman Y J. 2003. Water vapor retrievals using moderate resolution imaging spectroradiometer(MODIS) near-infrared channels. J Geophys Res，108(D13)：4389

Gao B C，Kaufman Y J. 2011. Algorithm technical background document：The MODIS near-IR water vapor algorithm[EB/OL]. Washington，DC：Naval Research Laboratory，https://modis.gsfc.nasa.gov/data/atbd/atbd_mod03.pdf

Gui K，Che H Z，Chen Q L，et al. 2017. Evaluation of radiosonde，MODIS-NIR-clear，and AERONET precipitable water vapor using IGS ground-based GPS measurements over China. Atmos Res，197：461-473

Gurbuz G，Jin S G. 2017. Long-time variations of precipitable water vapour estimated from GPS，MODIS and radiosonde observations in Turkey. Int J Climatol，37(15)：5170-5180

Herring T A，King R W，Floyd M A，et al. 2015. GAMIT reference manual GPS Analysis at MIT Release 10. 6. Boston，Cambridge：Massachusetts Institute of Technology

Liu J，Sun Z，Liang H，et al. 2005. Precipitable water vapor on the Tibetan Plateau estimated by GPS，water vapor radiometer，radiosonde，and numerical weather prediction analysis and its impact on the radiation budget. J Geophys Res，110(D17)：

D17106

Manandhar S, Lee Y H, Meng Y S, et al. 2017. A simplified model for the retrieval of precipitable water vapor from GPS signal. IEEE Trans Geos Remote Sens, 55(11): 6245-6253

Wang J H, Zhang L Y. 2008. Systematic errors in global radiosonde precipitable water data from comparisons with ground-based GPS measurements. J Climate, 21(10): 2218-2238

Wang Z Y, Zhou X H, Liu Y X, et al. 2017. Precipitable water vapor characterization in the coastal regions of China based on ground-based GPS. Adv Space Res, 60(11): 2368-2378

Zhao P, Xu X D, Chen F, et al. 2018. The third atmospheric scientific experiment for understanding the earth-atmosphere coupled system over the Tibetan Plateau and its effects. Bull Amer Meteor Soc, 99(4):757-776

欢迎订阅 2019 年度《气象学报》

《气象学报》中文版创刊于 1925 年,是由中国气象局主管,中国气象学会主办的全国性大气科学学术期刊,主要刊载有关大气科学及其交叉科学研究的具有创新性的论文;国内外大气科学发展动态的综合评述;新观点、新理论、新技术、新方法的介绍;研究工作简报及重要学术活动报道;优秀大气科学专著的评介以及有关本刊论文的学术讨论等。

《气象学报》中文版 2003 年和 2005 年连续两次荣获中华人民共和国新闻出版总署颁发的第二届、第三届“国家期刊奖百种重点学术期刊”奖;2013、2015、2017 年入选国家新闻出版广电总局“百强报刊”;2007—2011 年和 2015—2017 年获得中国科学技术协会精品科技期刊工程项目的资助,2008、2011、2014、2017 年被评为“中国精品科技期刊”;2003—2007、2009、2016 年被中国科学技术信息研究所评为“百种中国杰出学术期刊”;2012、2013、2014、2015 年获评“中国最具国际影响力学术期刊”;2016、2017 年获评“中国国际影响力优秀学术期刊”。

《气象学报》为大气科学研究提供了学术交流平台,一直致力于推动中国大气科学基础研究和理论研究的发展,服务于中国气象现代化建设事业。作者和读者对象主要为从事气象、海洋、地理、环境、地球物理、天文、空间及生态等学科的科研人员、高校师生。

《气象学报》中文版为双月刊,国内外发行。

2019 年全年共 6 期,定价 240 元/年。

邮发代号:2-368(国内)　　BM329(国际)

通讯地址:北京市中关村南大街 46 号　中国气象学会《气象学报》编辑部

邮政编码:100081

联系电话:010-68406942,68408571(传真)

邮　　箱:cmsqxxb@263.net;qxxb@cms1924.org

期刊主页:http://www.cmsjournal.net/qxxb_cn

开户银行:北京建行白石桥支行

户　　名:中国气象学会

帐　　号:11001028600059261046