

胡 姮, 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).

## L 波段探空观测偏差分析及订正算法研究<sup>\*</sup>

胡 姮 曹云昌 梁 宏

中国气象局气象探测中心, 北京 100081

**提 要:** 为了探讨探空观测的水汽可降水量资料的可靠性, 本文以 GNSS/MET 遥感的大气可降水量为参照标准, 对广东汕头站 2013 年以及西藏那曲站 2016 年 6 月至 2017 年 5 月的两种可降水量观测结果进行对比分析和偏差订正。经过研究分析表明: 两个站探空可降水量相比地基 GNSS 可降水量偏干, 偏差分别为 7.4% 和 9.8%。探空可降水量的偏差显示具有季节变化和日变化的特征, 其中夏季偏差较明显, 00 时比 12 时明显。太阳辐射加热引起的地面气温的日变化和季节变化是造成偏差的重要原因。本文根据太阳辐射偏差订正经验公式, 对两个站的探空可降水量进行偏差订正, 订正后偏差明显减少。

**关键词:** L 波段探空, 大气可降水量, 地基卫星导航 (GNSS), 偏差订正

**中图分类号:** P413

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.7519/j.issn.1000-0526.2019.04.006

## Systematic Errors and Their Calibrations for Precipitable Water Vapor of L-Band Radiosonde

HU Heng CAO Yunchang LIANG Hong

CMA Meteorological Observation Centre, Beijing 100081

**Abstract:** In order to investigate the reliability of total atmospheric water vapor data from L-band radiosonde observations (RS PW), the atmospheric water vapor of GNSS/MET remote sensing (GNSS PW) is taken as the reference standard in this paper to comparatively analyze and correct the observed RS PW at Shantou Station in 2013 and Nagqu Station from June 2016 to May 2017. Research and analysis show that RS PWs at the two stations are obviously smaller than GNSS PW, and the deviations are 7.4% and 9.8%, respectively. The deviation has obvious seasonal and diurnal variation characteristics. In summer it is most obvious, and is more obvious at 0000 UTC than at 1200 UTC. Solar radiation heating and air temperature changes in the daily and seasonal variations are important reasons for the deviation. According to solar radiation bias correction formula, the L bias correction algorithm is proposed and used for correction. Then the deviation is reduced obviously after correction.

**Key words:** L-band radiosonde, precipitable water vapor, ground-base GNSS, systematic error calibration

<sup>\*</sup> 中国气象局气象探测中心青年基金项目 (MOCQNJJ201404) 资助

2018 年 1 月 18 日收稿; 2018 年 6 月 14 日收修定稿

第一作者: 胡姮, 主要从事地基导航卫星遥感水汽技术研究. Email: huheng83@163.com

## 引言

水汽是大气的重要组成部分,是大气温室效应的主要因素之一,其变化强烈影响着水循环、气溶胶成分以及云的形成(Gui et al, 2017)。水汽还是天气、气候变化的主要驱动力,是局地强对流天气系统形成和演变过程中的重要因子。我国平均每年有 3~4 个热带气旋由南海在华南沿海地区登陆,使该地区常常因预报、预警以及防御不及时而遭受重大灾害。凝结潜热释放是热带气旋发生发展的主要驱动力,因此良好的水汽条件是热带气旋得以突然加强的重要前提(于润玲等, 2013)。研究华南沿海地区大气水汽变化对区域天气和台风等强对流天气的预报有很大影响。青藏高原对地球上最明显季风环流的形成起着重要作用,通过特殊大地形动力、热力作用深刻地影响着东亚与全球大气水分循环分布,也对全球气候与环境产生深远的影响(吴国雄等, 2004; 梁宏等, 2006; 施小英和施晓晖, 2008; 傅慎明等, 2011; 徐祥德等, 2014; 李德帅, 2016)。这两个区域水汽资源的来源、分布以及观测的准确性一直是人们关注的重大问题,本文选取汕头和那曲这两个具有区域代表性的台站针对不同仪器观测结果的连续性、一致性、是否同址等条件筛选,确定分别使用 2013 和 2016 年的观测结果进行分析研究。

在过去的几十年间,国内外针对大气水汽水平和垂直结构分布的探测方法得到逐渐发展,主要包括:常规无线电探空技术(李伟等, 2009; 郝民等, 2014; 2015; 陈哲等, 2015)、地基卫星导航(GNSS)遥感观测技术(Bevis et al, 1992)、水汽微波辐射计(Cadeddu et al, 2013; 郝民等, 2015)、多通道窄带滤波辐射计(Li et al, 2016)、拉曼雷达(Wang et al, 2015)、再分析格点数据分析(徐影等, 2001; Bock et al, 2007; Wang and Zhang, 2008)等。其中,探空是传统的业务观测手段,其具有较高的观测精度,通常用作检验其他观测方法的准确性,但是,较高的成本、稀疏的空间分布、较低的观测频率使其应用具有局限性。星载微波辐射计更加适用于洋面观测(Liu et al, 2005);再分析格点数据优点是网格数据可描述水汽的空间分布状况,但是资料的适用性和准确性需要用进行验证(赵瑞霞和吴国雄, 2007)。另一种应用广泛可靠性较高的水汽观测方法是地基 GNSS 遥感观测,通过测量卫星在大气中的延迟信

息结合地面气象观测数据反演得到大气中水汽含量。国内外开展的试验研究,表明地基 GNSS 遥感技术通过高覆盖率的地基 GNSS 水汽探测网络,可以提供高时空分辨力的空中可降水量的数据(Wang et al, 2017; Manandhar et al, 2017; 李成才和毛节泰, 1998; 李国平等, 2010; 张俊东等, 2013)。通过试验研究证明,地基 GNSS 遥感观测的可降水量与探空、微波辐射计等其他观测结果具有很好的相关性(Braun et al, 2003; Cadeddu et al, 2013; 郝民等, 2015),其观测具有低成本、适用性强、高时空分辨率等特点,观测精度在 1~2 mm 左右(Elgered et al, 1997; Vaquero-Martínez et al, 2017)。

L 波段探空观测的湿度是目前应用范围较广的湿度探测资料,其资料观测精度直接影响再分析资料的精度和模式降水预报的结果。探空仪的湿度观测结果在接近饱和和大气时出现干偏差(Lorenc et al, 1996; Nuret et al, 2008; 向春玉等, 2009),不同探空仪测量的湿度偏干程度不同(Agustí-Panareda et al, 2009; 李伟等, 2010; 颜晓露等, 2012; 唐南军等, 2014)。地基 GNSS/MET 可降水量的精度与微波辐射计探测结果的精度相近,优于探空可降水量的精度(Liou et al, 2001; 毕研盟等, 2006)。Liu et al(2005)对比了高原那曲站的地基 GNSS/MET、探空以及微波辐射计观测的可降水量结果,发现地基 GNSS/MET 与微波辐射计的观测结果很接近,探空观测结果与前两者之间存在偏干的现象。向春玉等(2009)以湖北省为例,分别用气象探空资料累加计算、地基 GNSS/MET 探测资料反演以及地面气象资料推算等三种方法计算出该省空中可降水量,结果表明地面法和地基 GNSS/MET 反演空中可降水量精度相比探空较高。利用地基 GNSS 遥感观测的可降水资料对探空仪湿度观测资料进行偏干订正,将订正前后的结果进行降水预报的同化试验,结果显示偏干订正后的预报效果得到显著改进。目前,中国气象局在全国范围内建设了 120 个常规探空站,使用的探空系统全部升级为 L 波段。经过前期的研究分析,探空湿度资料存在偏干误差的主要因素有:由探空仪湿度传感器性能不同造成的观测误差、探空仪系统误差以及日采样频率低造成的误差(Wang and Zhang, 2008)。本文综合利用广东汕头站 2013 年 1—12 月以及西藏那曲站 2016 年 6 月至 2017 年 5 月的探空、地基 GNSS 资料,初步分析探空可降水量的观测偏差以及相关原因,提

出订正算法。

## 1 资料获取与数据处理

### 1.1 资料介绍

汕头(23.42°N、116.6°E)地基 GNSS/MET 站与汕头 L 波段业务探空站(海拔 26.28 m)、那曲(31.48°N、92.06°E)地基 GNSS/MET 站与那曲 L 波段业务探空站(海拔 4477 m)水平距离小于 500 m。相关研究(Wang and Zhang, 2008)认为,探空站和地基 GNSS 站同址,解算的大气水汽含量是可以进行对比分析的。表 1 给出了两个地基 GNSS 观测站的相关观测设备信息。

表 1 地基 GNSS 与探空站的设备信息

Table 1 Equipment information of GNSS and sounding

站名	GNSS 站的归属	GNSS 站	探空站
汕头	地震部门	TRIMBLE NETR8	GTS-1 (数字式电子探空仪)
那曲	气象部门	TRIMBLE NETRS	GTS-1 (数字式电子探空仪)

### 1.2 数据处理

#### 1.2.1 地基 GNSS 可降水量

由于 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,通过静力模型计算干空气的影响,同时分析不同频率的 GNSS 信号差异来确定电离层的影响。在大气总延迟中去除干空气和电离层的影响后即可得出信号传输路径上湿空气(水汽部分)的总湿延迟,最后由湿延迟反演出大气水汽总含量(曹云昌等,2007)。

本文获取了汕头、那曲两个站地基 GNSS 遥感观测数据,选取了国内和国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 软件进行了解算。GAMIT 是由 MIT(麻省理工学院)开发的国际上普遍采用的 GPS 数据后处理软件。

将汕头、那曲两个站与 IGS 参考站组网解算,

设置的卫星约束为 0.01,即  $10^{-8}$  的相对精度。解算方式选择 LC\_HELP,试用于长基线的解算。台站坐标约束以地心为中心的三维站坐标,其纬度、经度、半径三个方向的约束分别为 1.00、1.00、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、0.1 m。

天顶延迟估算采用每半小时一个,每天总共 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,采样率为 10 min 一组。

#### 1.2.2 探空可降水量

获取 2013 年 1—12 月汕头站、2016 年 6 月 1 日至 2017 年 5 月 31 日那曲业务探空站的 L 波段探空仪秒数据,提取其中秒间隔的气压、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》(中国气象局,2010;《大气科学辞典》编委会,1994)。

## 2 结果及分析

### 2.1 探空可降水量偏差的特征分析

图 1 给出了 2013 年 1—12 月汕头站、2016 年 6 月至 2017 年 5 月那曲站地基 GNSS 可降水量和探空可降水量散点分布,可以看出两个站的地基 GNSS 可降水量略大于探空可降水量,而探空观测的可降水量时通过探空观测的相对湿度计算而来的,说明探空的湿度观测量偏干。

图 2 给出了 2013 年 1—12 月汕头站以及 2016 年 6 月至 2017 年 5 月那曲站探空可降水量与地基 GNSS 可降水量偏差的月平均变化。从图 2a、2b 可以看出偏差具有年变化特征,夏季比冬季明显。汕头站的偏差月平均值从 1—7 月呈现明显的上升趋势,冬季的偏差月平均值约 1~2 mm,夏季最高达到 5.37 mm。那曲站的偏差月平均值在 2016 年 6—9 月维持在 0.8~1 mm 左右,从 2016 年 10 月开始下降,至 2017 年 1 月下降至最低点 0.149 mm,2017 年 2 月开始逐渐上升。从图 2 可以看出,汕头站 4—9 月 00 时的偏差(图 2c)明显小于同时段 12 时的偏差(图 2e),那曲站 00 时的偏差(图 2d)明显小于 12 时的偏差(图 2f)。另外,00 和 12 时(世界时,下同)的偏差也有明显年变化特征,夏季比冬季明显。汕头站 12 时偏差夏季最大达到 5.59 mm,

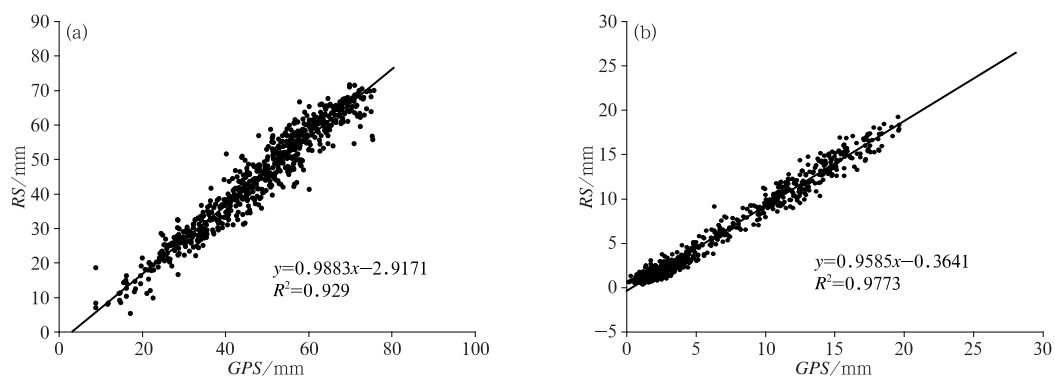


图 1 2013 年 1—12 月汕头站(a), 2016 年 6 月至 2017 年 5 月那曲站(b)

地基 GNSS 可降水量和探空可降水量散点分布

Fig.1 Scatter distribution of GNSS PW and RS PW at Shantou Station from January to December 2013 (a) and Nagqu Station from June 2016 to May 2017 (b)

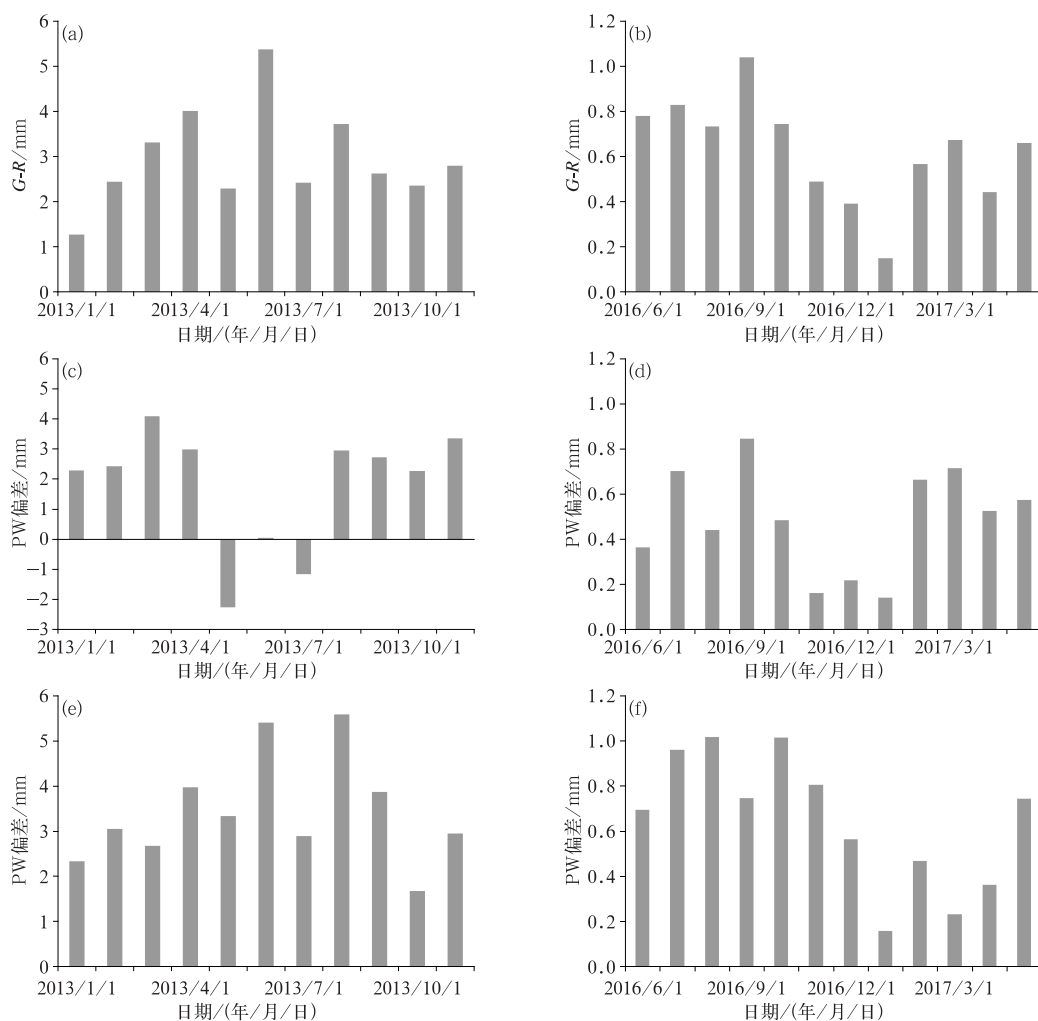


图 2 2013 年 1—12 月汕头站(a,c,e)和 2016 年 6 月至 2017 年 5 月那曲站(b,d,f)探空可降水量偏差月平均变化(a,b);00 时(c,d)和 12 时偏差(e,f)

Fig.2 Average monthly deviation change (a, b) between GNSS PW and RS PW at Shantou Station from January to December 2013 (a, c, e) and at Nagqu Station from June 2016 to May 2017 (b, d, f); deviation at 0000 UTC (c, d) and at 1200 UTC (e, f)

冬季最低降至 1.67 mm。那曲站 12 时偏差夏季最大达到 1.02 mm,冬季最低降至 0.15 mm。

图 3 给出了汕头站夏季和那曲站冬季 00 和 12 时的偏差的变化情况,汕头站夏季 12 时的偏差基本大于 0 mm,最大可达 8.84 mm。00 时的偏差在 5 和 7 月为负值,最小可达-3 mm,12 时的偏差明显大于 00 时的偏差。那曲站的 12 时偏差基本大于 0,最大可达 2.06 mm,00 时的偏差在 2016 年 12 月至 2017 年 1 月出现负值,12 时的偏差明显大于 00 时。

从表 2 可见,汕头站的总偏差、00 时偏差和 12 时偏差分别为 3.23、3.1 和 3.37 mm,那曲站的总偏差、00 时偏差和 12 时偏差分别为 0.61、0.61 和 0.62 mm,显然两个站 12 时的偏差较大。均方根误差能够很好地代表探空的随机误差(Wang and Zhang,2008)。汕头站总体、00 和 12 时的均方根误差分别为 4.85、4.27 和 5.38 mm,那曲站总体、00 和 12 时的均方根误差分别为 5.33、5.20 和 5.43 mm,可

见两个站 12 时的探空随机误差比 00 时显著。

以上分析表明:与地基 GNSS 可降水量相比,汕头和那曲站的探空可降水量偏小,探空的湿度观测偏干。探空可降水量与地基 GNSS 降水量的偏差呈现明显的季节变化和日变化特征,夏季比冬季明显,12 时比 00 时明显。

2.2 探空可降水量偏差的原因

汕头站和那曲站的地基 GNSS 测站和探空站均在当地地面气象观测场内,两种观测设备之间的距离小于 500 m,认为不会因为不同的观测设备之间的空间距离造成系统性误差(Wang and Zhang,2008)。

地基 GNSS 遥感观测通过测量卫星在大气中的延迟信息结合地面气象观测数据反演得到大气中水汽含量,其水平探测半径为 20~30 km,垂直探测高度为 10 km。探空仪在观测路径上由于水平气流的作用会发生漂移,水平移动的距离在 20 km 左

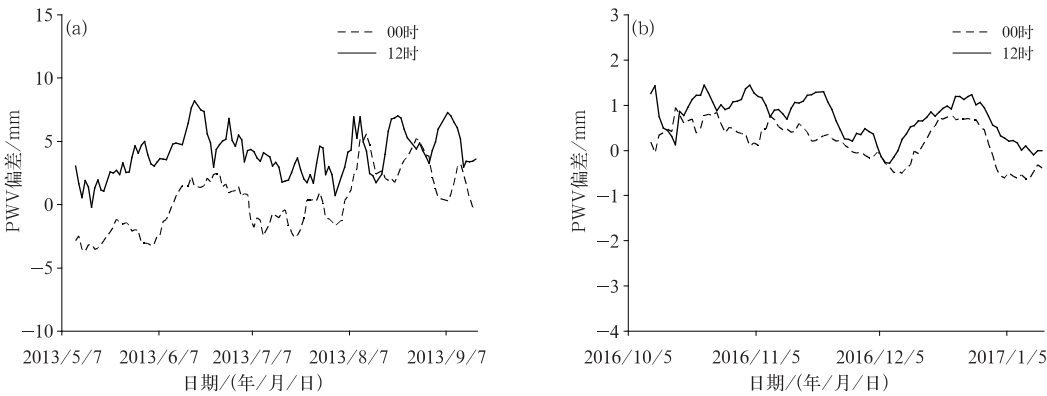


图 3 2013 年 4—9 月汕头站(a)、2016 年 10 月至 2017 年 1 月那曲站(b) 00 和 12 时偏差多项式拟合曲线

Fig. 3 Polynomial fitting curve of deviation between GNSS PW and RS PW at Shantou Station from April to September 2013 (a) and at Nagqu Station from October 2016 to January 2017 (b)

表 2 汕头、那曲站地基 GNSS 可降水量和探空可降水量的对比情况

Table 2 Comparison of GNSS PW and RS PW at Shantou Station and Nagqu Station

站名	观测时间	时刻/UTC	样本数	相关系数	均方根误差/mm	偏差/mm
汕头	2013 年 1 月 1 日至 12 月 31 日	all	604	0.967	4.85	3.23
		00	303	0.966	4.27	3.1
		12	301	0.978	5.38	3.37
		all	721	0.984	5.33	0.61
那曲	2016 年 6 月 1 日至 2017 年 5 月 31 日	00	360	0.98	5.20	0.61
		12	361	0.988	5.43	0.62

右。两种结果受水平方向大气非均匀性的影响相差不大。因此,两种观测设备的观测方式不同造成的系统误差不是探空偏差的主要因素。

目前,为了减少天顶总延迟(ZTD)解算误差,地基 GNSS 遥感可降水量的解算充分考虑解算参数的约束方案、投影函数等因素。通过引用正态分布以及  $3\sigma$  的原理来描述汕头和那曲站的地基 GNSS 观测数据质量情况。用  $ZTD-\sigma$  代表天顶总延迟的数据质量特性值,大小等于  $3\sigma$ 。地基 GNSS 遥感观测的天顶总延迟的质量特性值分布可以用式(1)来描述:

$$F(x) = \int_{-\infty}^x f(x) dx = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \int_{-\infty}^x \exp\left[-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right] dx \quad (1)$$

式中, $\sigma$  为标准差,代表数据质量特性值  $x$  分布的离散程度, $\mu$  为正态均值,代表数据质量特性值分布的集中位置。在  $\pm 3\sigma$  范围内包含了 99.73% 的质量特性值。从图 4 可以看出,汕头站春夏季的  $ZTD-\sigma$  相

比秋、冬季较大,变化的波动也较明显,而那曲站夏季的  $ZTD-\sigma$  相比其他季节较大,本研究获取的汕头、那曲站的  $ZTD-\sigma$  值主要分布在 15 mm 以下,相应的可降水量误差在 2 mm 以内,说明汕头和那曲站的地基 GNSS 可降水量数据的精度较高,可以作为订正探空可降水量偏干误差的参考。

从探空仪湿度传感器本身的测量误差分析,探空仪会出现偏干现象可能因为探空仪的湿度传感器的灵敏性不够。邢毅等(2009)的研究表明,探空仪在进入云中高湿层后达不到饱和,而出云后在惯性作用下湿度测量值由于滞后效应继续下降,在辐射加热后相对湿度观测恢复时,相对湿度很快地变大,这表明湿度传感器可以自动恢复感应能力。

以上分析表明,探空仪湿度传感器的设备误差是导致探空可降水量偏干的主要原因。

### 2.3 探空可降水量偏差的影响因子

探空可降水量偏差有明显的日变化特征,这与探空仪湿度传感器本身的特性有关。当白天太阳辐射较强的情况下,湿度传感器在吸收太阳辐射后,周围空气的温度随之升高,由于空气中的实际水汽压并未改变,而饱和水汽压随着气温升高,因而相对湿度降低。此时湿度传感器的观测值并非是真的相对湿度,因此需要对相对湿度进行太阳辐射误差修正(冒晓莉等,2014)。汕头和那曲站太阳辐射在 12 时比 00 时强很多,太阳辐射值与当地的太阳天顶角的大小相关,根据 Cady-Pereira et al(2008)的研究,探空仪湿度测量的系统误差与太阳天顶角的变化相关性较大。汕头、那曲站探空可降水量和地基 GNSS 可降水量的偏差与当地太阳天顶角的相关系数分别为 0.22 和 0.13,从图 5 可看出,太阳辐射越强,探空可降水量偏差越明显。

将汕头、那曲站 12 时的探空可降水量与地基 GNSS 可降水量偏差按照太阳天顶角每  $2^\circ$  计算一次均值,由图 6 可以看出,12 时的偏差整体变化趋势是随着太阳天顶角的增大而减弱,说明太阳辐射对探空可降水量的偏差有较大影响。但是汕头站偏差在太阳天顶角  $66^\circ \sim 72^\circ$  呈现相反的变化趋势,说明太阳辐射加热可能不是影响探空可降水量偏差的唯一因素。

将汕头、那曲站 12 时的探空可降水量与地基 GNSS 可降水量偏差按照温度每  $2^\circ\text{C}$  计算一次均值,从图 7 可以看出,偏差随着温度增大呈现逐渐增

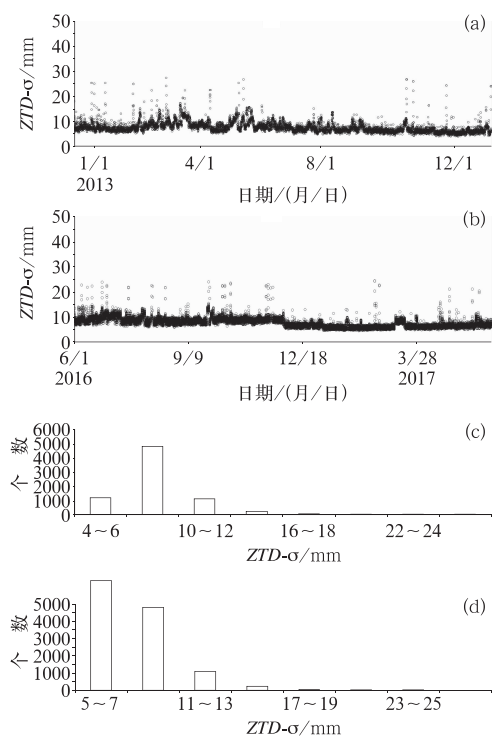


图 4 汕头站(a, c)、那曲站(b, d)  $ZTD-\sigma$  时序变化(a, b)及其分布情况(c, d)

Fig. 4 Variation of time series of the  $ZTD-\sigma$  (a, b) and their distributions (c, d) at Shantou Station (a, c) and Nagqu Station (b, d)

大的趋势。汕头站偏差均值主要集中在2~4 mm, 那曲站主要集中在0.5 mm左右。汕头站20℃以下偏差随温度变化的幅度基本在2.5 mm以下, 那曲站-4℃以下偏差随温度变化的幅度基本在

0.5 mm以下,可以看出本文选用的样本具有气温越低,PWV偏差越不显著的特点,但此特性及其原因需要积累更多的观测数据进行分析研究。

从图8可以看出,汕头站探空可降水量偏差与

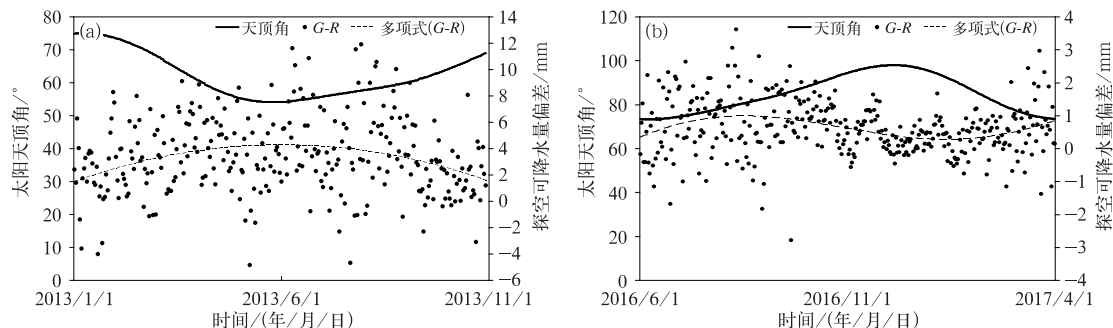


图5 汕头站(a)、那曲站(b)地基GNSS可降水量和NCEP可降水量偏差与当地太阳天顶角散点图

Fig. 5 Scatter distribution of PWV deviation and local solar zenith angle at Shantou Station (a) and Nagqu Station (b)

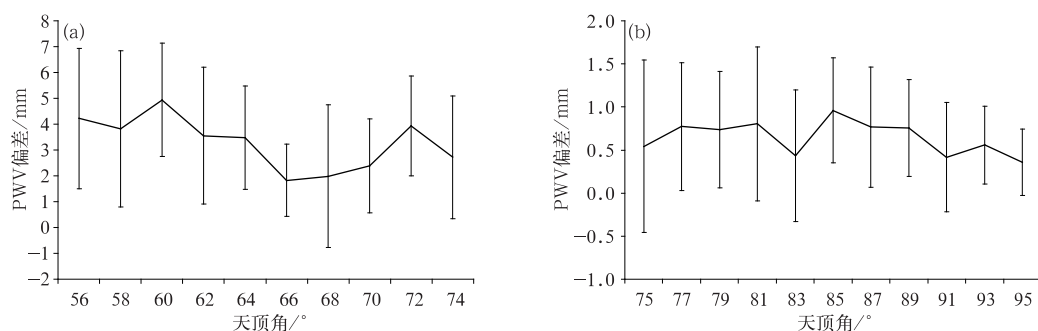


图6 汕头站(a)、那曲站(b)12时PWV偏差随太阳天顶角的变化趋势(每2°计算偏差平均值,误差棒表示标准差)

Fig. 6 Changes of PWV deviation with solar zenith angle at Shantou Station (a) and Nagqu Station (b) at 1200 UTC (Average deviation is calculated every 2°, error bars indicate standard deviation)

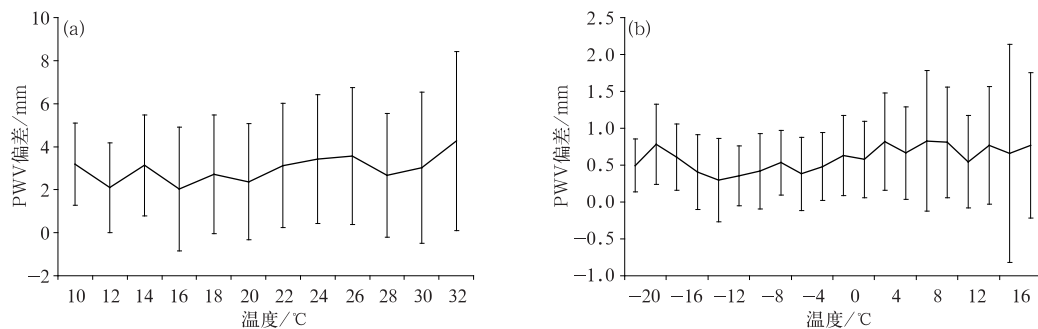


图7 同图6,但为温度

Fig. 7 Same as Fig. 6, but for temperature



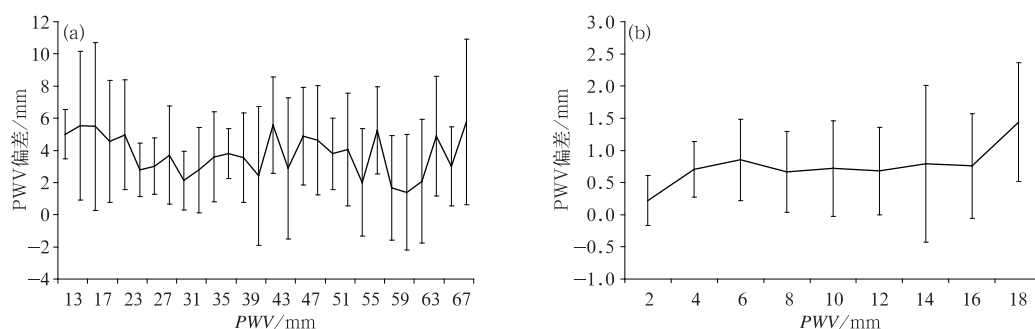


图 8 同图 6, 但为地基 GNSS 可降水量

(每 2 mm 计算偏差平均值, 误差棒表示标准差)

Fig. 8 Same as Fig. 6, but for precipitable water vapor

(Average deviation is calculated every 2 mm, error bars indicate standard deviation)

PWV 的大小相关性没有明显一致的规律性, 偏差的波动比较剧烈, 可能与汕头站所在地区局地性强对流天气系统较多有关系, 这还需要积累更加长期的观测数据进行分析。那曲站偏差随着 PWV 增大而逐渐增大, 但是偏差主要集中在 0.5~1 mm, 从本文获取的数据资料无法说明 PWV 的大小是否会造成探空可降水量的偏差的主要原因。

## 2.4 偏差订正

通过大量试验分析探空观测与模式背景场(O-B)的偏差特点, 英国气象局早在 1996 年研究发现探空仪在探测水汽接近饱和时出现观测值偏低, 相关研究(Lorenc et al, 1996; Nuret et al, 2008)给出相应的偏差订正分段线性函数, 对观测值进行偏干订正, 订正后对于当地降水预报有明显的正贡献。根据 2.3 节的分析表明, 考虑太阳辐射加热和地面气温的日变化和季节变化是造成汕头、那曲站 12 时探空可降水量偏差的重要原因。分析偏差随太阳天顶角和地面气温的变化特征, 根据太阳辐射偏差订正经验公式, 建立探空可降水量偏干订正的经验公式(梁宏等, 2012)。

首先, 分析 12 时汕头、那曲站的 G-R 的平均值随太阳天顶角的变化情况, 然后对其进行多项式拟合, 然后, 建立 G-R 的平均剩余值与地面气温的经验公式。

$$\Delta R = \begin{cases} -90.677 + 3.133\theta - 0.037\theta^2 + \\ 0.00014\theta^3 + f(T) & (\theta < 90^\circ) \\ f(T) & (\theta > 90^\circ) \end{cases} \quad (2)$$

$$R_D = R - \Delta R \quad (3)$$

式中,  $R_D$  为订正后的探空可降水量,  $R$  为实际观测

的探空可降水量,  $\Delta R$  为探空可降水量偏差订正值(单位: mm);  $\theta$  为 12 时的当地的太阳天顶角(单位:  $^\circ$ );  $T$  为地面气温(单位:  $^\circ\text{C}$ )。  $f(T)$  的计算公式如下:

$$f(T) = 0.3227 \exp \left[ - \left( \frac{T - 14.45}{9.089} \right)^2 \right] - 0.26 \quad (4)$$

采用式(2)~式(4)分别对汕头、那曲站探空可降水量偏差进行订正。从图 9 所示, 订正后的探空可降水量与地基 GNSS 可降水量的相关性更大, 说明探空可降水量的偏差明显减少。表 3 给出了 12 时的探空可降水量在订正前后与地基 GNSS 的对比情况, 可以看出, 汕头、那曲站两种观测结果的相关系数分别从 98% 提高至 99%, 偏差分别从 3.48、0.62 mm 减少至 1.42、0.004 mm, 均方根误差分别从 5.38、5.43 mm 减少至 5.12、5.40 mm。对汕头、那曲站的探空可降水量进行偏干订正以后, 偏差减小, 与地基 GNSS 可降水量结果相关性较好。

## 3 结论与讨论

(1) 将 2013 年 1 月 1 日至 12 月 31 日汕头站、2016 年 6 月 1 日至 2017 年 5 月 31 日那曲站的探空可降水量和地基 GNSS 可降水量进行对比, 发现探空可降水量明显偏干, 两种观测结果的偏差具有明显的季节变化和日变化特征。夏季比冬季明显, 12 时比 00 时更明显。

(2) 分析造成两种观测结果偏差的变化特性的原因主要是太阳辐射加热以及地面气温的影响。PWV 大小对探空可降水量偏差的影响在两个站的



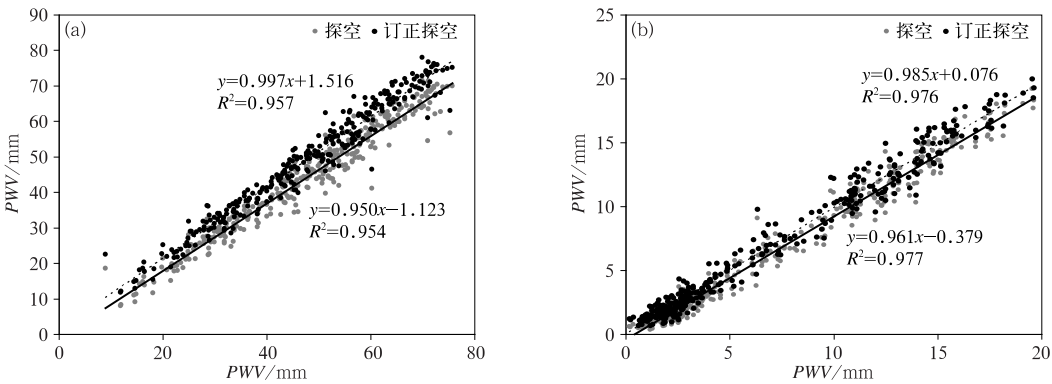


图 9 汕头(a)、那曲(b)站 12 时探空可降水量的偏差订正前后散点分布  
Fig. 9 Scatter distribution of the 1200 UTC deviation PWV before and after corrections  
at Shantou Station (a) and Nagqu Station (b)

表 3 汕头、那曲站探空可降水量订正前后与地基 GNSS 可降水量的对比情况  
Table 3 Comparison of deviation between GNSS PW and RS PW before and  
after corrections at Shantou Station and Nagqu Station

站名	观测时间	是否订正	相关系数	偏差/mm	均方根误差/mm
汕头	2013 年 1 月 1 日至 12 月 31 日	否	0.98	3.48	5.38
		是	0.99	1.42	5.12
那曲	2016 年 6 月 1 日至 2017 年 5 月 31 日	否	0.98	0.62	5.43
		是	0.99	0.004	5.40

表现没有明显一致的规律,需要进一步积累观测数据进行分析研究。

(3) 利用太阳辐射特性,采用相关经验公式对汕头、那曲站的探空可降水量进行偏干订正,构建了订正公式,结果表明订正后的探空可降水量的偏干现象获得很好的改进。

本文利用汕头、那曲站的观测资料分析探空和地基 GNSS 可降水量之间的偏差以及造成偏差的原因,由于造成偏差的原因较复杂,本研究得到的结果不能代表所有的探空仪设备。另外,地形、观测环境、气候的不同造成的偏差特性也需要积累更多的观测资料进一步研究分析。

参考文献

毕研盟,毛节泰,李成才,等,2006. 利用 GPS 的倾斜路径观测暴雨过程中的水汽空间分布[J]. 大气科学,30(6):1169-1176. Bi Y M, Mao J T, Li C C, et al, 2006. Spatial distribution of water vapor observed with GPS along slant path in a storm system[J]. Chin J Atmos Sci, 30(6):1169-1176(in Chinese).  
曹云昌,方宗义,夏青,2007. 地基 GPS 气象站网建设指南[M]. 北京:气象出版社:90. Cao Y C, Fang Z Y, Xia Q, 2007. Ground-Based GPS Weather Station Network Construction Guide[M]. Beijing:China Meteorological Press:90(in Chinese).

陈哲,杨溯,刘靛珂,2015. 1979—2012 年中国探空相对湿度资料的非均一性检验与订正[J]. 气象,41(11):1374-1382. Chen Z, Yang S, Liu L K, 2015. Inhomogeneity test and correction of China radiosonde relative humidity data from 1979 to 2012[J]. Meteor Mon, 41(11):1374-1382(in Chinese).  
《大气科学辞典》编委会,1994. 大气科学辞典[M]. 北京:气象出版社:346. Editorial 《Dictionary of Atmospheric Sciences》, 1994. Dictionary of Atmospheric Sciences[M]. Beijing:China Meteorological Press, 346(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[J]. 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 [J]. Acta Meteor Sin, 69(4):581-600(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[J]. 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 [J]. Acta Meteor Sin, 73(1):187-199(in Chinese).  
郝民,田伟红,龚建东,2014. L 波段秒级探空资料在 GRAPES 同化系统中的应用研究[J]. 气象,40(2):158-165. Hao M, Tian W H, Gong J D, 2014. Study of L-band second-level radiosonde data applied in GRAPES assimilation system [J]. Meteor Mon, 40(2):158-165(in Chinese).  
李成才,毛节泰,1998. GPS 地基遥感大气水汽总量分析[J]. 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[J]. J Appl Meteor, 9(4): 470-477 (in Chinese).
- 李德帅, 2016. 基于逐小时资料的华南地区汛期降水时空变化特征及其成因研究[D]. 兰州: 兰州大学. Li D S, 2016. Research on the spatiotemporal characteristics of hourly precipitation over South China during the warm season and its possible causes [D]. Lanzhou: Lanzhou University (in Chinese).
- 李国平, 黄丁发, 郭洁, 等, 2010. 地基 GPS 气象学[M]. 北京: 科学出版社: 89-92. Li G P, Huang D F, Guo J, et al, 2010. Ground-Based GPS Meteorology [M]. Beijing: Science Press: 89-92 (in Chinese).
- 李伟, 李峰, 赵志强, 等, 2010. L 波段气象探测系统建设技术评估报告[M]. 北京: 气象出版社: 15-17. Li W, Li F, Zhao Z Q, et al. 2010. L-Band Meteorological Detection System Construction Technology Assessment Report [M]. Beijing: China Meteorological Press. 15-17 (in Chinese).
- 李伟, 邢毅, 马舒庆, 2009. 国产 GTS1 探空仪与 VAISALA 公司 RS92 探空仪对比分析[J]. 气象, 35(10): 97-102. Li W, Xing Y, Ma S Q, 2009. The analysis and comparison between GTS1 radiosonde made in China and RS92 radiosonde of Vaisala Company[J]. Meteor Mon, 35(10): 97-102 (in Chinese).
- 梁宏, 刘晶森, 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[J]. 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]. J Natural Res, 21(4): 526-534 (in Chinese).
- 梁宏, 张人禾, 刘晶森, 等, 2012. 青藏高原探空大气水汽偏差及订正方法研究[J]. 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[J]. Chin J Atmos Sci, 36(4): 795-810 (in Chinese).
- 冒晓莉, 肖韶荣, 刘清倦, 等, 2014. 探空湿度测量太阳辐射误差修正流体动力学研究[J]. 物理学报, 63(14): 144701. Mao X L, Xiao S R, Liu Q Q, et al, 2014. Fluid dynamic analysis on solar heating error of radiosonde humidity measurement[J]. Acta Physica Sin, 63(14): 144701 (in Chinese).
- 施小英, 施晓晖, 2008. 夏季青藏高原东南部水汽收支气候特征及其影响[J]. 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]. J Appl Meteor Sci, 19(1): 41-46 (in Chinese).
- 唐南军, 刘艳, 李刚, 等, 2014. 中低空探空相对湿度观测数据的新问题——基于中国 L 波段探空系统湿度观测异常偏干现象的初步分析[J]. 热带气象学报, 30(4): 643-653. Tang N J, Liu Y, Li G, et al, 2014. New issue of relative humidity observations in the middle and low troposphere: preliminary analysis on abnormally dry phenomena of the Chinese L-band radiosonde system[J]. J Trop Meteor, 30(4): 643-653 (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[J]. 气象学报, 62(5): 528-540. Wu G X, Mao J Y, Duan A M, et al, 2004. Recent progress in the study on the impacts of Tibetan Plateau on asian summer climate[J]. Acta Meteor Sin, 62(5): 528-540 (in Chinese).
- 向玉春, 陈正洪, 徐桂荣, 等, 2009. 三种大气可降水量推算方法结果的比较分析[J]. 气象, 35(11): 48-54. Xiang Y C, Chen Z H, Xu G R, et al, 2009. A comparison and analysis of the results of three methods for the calculation of water vapor resources[J]. Meteor Mon, 35(11): 48-54 (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[J]. 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[J]. 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[J]. 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[J]. Acta Meteor Sin, 72(6): 1079-1095 (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[J]. 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[J]. J Appl Meteor Sci, 12(3): 337-347 (in Chinese).
- 颜晓露, 郑向东, 李蔚, 等, 2012. 两种探空仪观测湿度垂直分布及其应用比较[J]. 应用气象学报, 23(4): 433-440. Yan X L, Zheng X D, Li W, et al, 2012. Inter-comparison and application of atmospheric humidity profiles measured by CFH and Vaisala Rs80 radisondes[J]. J Appl Meteor Sci, 23(4): 433-440 (in Chinese).
- 于润玲, 余晖, 端义宏, 2013. 登陆华南热带气旋强度变化与大尺度环流的关系[J]. 大气科学学报, 36(5): 619-625. Yu R L, Yu H, Duan Y H, 2013. Relationship between intensity change of tropical cyclone landing in South China and large-scale circulation. Trans Atmos Sci, 36(5): 619-625 (in Chinese).
- 张俊东, 陈秀芳, 李颖, 等, 2013. 基于 GPS 数据的 MODIS 近红外水汽改进反演算法研究[J]. 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[J]. Geography and Geo-Information Science, 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[J]. 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[J]. Acta Meteor Sin, 65(3): 416-427 (in Chinese).
- 中国气象局, 2010. 常规高空气象观测业务规范[M]. 北京: 气象出版社: 81. China Meteorological Administration, 2010. Conventional Upper Air Observation Service Specification [M]. Beijing: China Meteorological Press: 81 (in Chinese).

- Agusti-Panareda A, Vasiljevic D, Beljaars A, et al, 2009. Radiosonde humidity bias correction over the West African region for the special AMMA reanalysis at ECMWF[J]. *Quart J Roy Meteor Soc*, 135(640):595-617.
- 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.
- 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. DOI: 10.1029/2006GL028039.
- Braun J, Rocken C, Liljegren J, 2003. Comparisons of line-of-sight water vapor observations using the global positioning system and a pointing microwave radiometer[J]. *J Atmos Ocean Technol*, 20(5):606-612.
- Cadeddu M P, Liljegren J C, Turner D D, 2013. The atmospheric radiation measurement (ARM) program network of microwave radiometers: instrumentation, data, and retrievals [J]. *Atmos Meas Tech*, 6(9):2359-2372.
- Cady-Pereira K E, Shephard M W, Turner D D, et al, 2008. Improved daytime column-integrated precipitable water vapor from vaisala radiosonde humidity sensors[J]. *J Atmos Ocean Technol*, 25(6):873-883.
- Elgered G, Johansson J M, Rönnäng B O, et al, 1997. Measuring regional atmospheric water vapor using the swedish permanent GPS network[J]. *Geophys Res Lett*, 24(21):2663-2666.
- 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[J]. *Atmos Res*, 197:461-473.
- Li X, Zhang L, Cao X J, et al, 2016. Retrieval of precipitable water vapor using MFRSR and comparison with other multisensors over the semi-arid area of northwest China[J]. *Atmos Res*, 172-173:83-94.
- Liou Y A, Teng Y T, van Hove T, et al, 2001. Comparison of precipitable water observations in the near tropics by GPS, microwave radiometer, and radiosondes[J]. *J Appl Meteor*, 40(1):5-15.
- 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]. *J Geophys Res*, 110(D17):D17106. DOI: 10.1029/2004JD005715.
- Lorenc A C, Barker D, Bell R S, et al, 1996. On the use of radiosonde humidity observations in mid-latitude NWP[J]. *Meteor Atmos Phys*, 60(1/2/3):3-17.
- Manandhar S, Lee Y H, Meng Y S, et al, 2017. A simplified model for the retrieval of precipitable water vapor from GPS signal[J]. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 55(11):6245-6253.
- Nuret M, Lafore J P, Guichard F, et al, 2008. Correction of humidity bias for vaisala RS80-a sondes during the AMMA 2006 observing period[J]. *J Atmos Ocean Technol*, 25(11):2152-2158.
- Vaquero-Martínez J, Antón M, de Galisteo J P O, et al, 2017. Validation of integrated water vapor from OMI satellite instrument against reference GPS data at the Iberian Peninsula[J]. *Sci Total Environ*, 580:857-864.
- 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.
- Wang M, Fang X, Hu S X, et al, 2015. Variation characteristics of water vapor distribution during 2000—2008 over Hefei (31.9°N, 117.2°E) observed by L625 lidar[J]. *Atmos Res*, 164-165:1-8.
- 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[J]. *Adv Space Res*, 60(11):2368-2378.