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 [J]. 大气科学, 36 (4): 795-810, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2011.11149. Liang Hong, Zhang Renhe, Liu Jingmiao, et al. 2012. Systematic errors and their calibrations for radiosonde precipitable water vapor on the Tibetan Plateau [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 36 (4): 795-810.

# 青藏高原探空大气水汽偏差及订正方法研究

梁宏<sup>1,2</sup> 张人禾<sup>1</sup> 刘晶淼<sup>1,3</sup> 孙治安<sup>4</sup> 李世奎<sup>1</sup> 1中国气象科学研究院,北京 100081 2中国科学院研究生院,北京 100049 3中国气象局沈阳大气环境研究所,沈阳 110016 4 Centre for Australian Weather and Climate Research, Australian Bureau of Meteorology, Melbourne, Australia

**摘 要** 水汽是大气的主要成分和降水的主要物质来源。青藏高原大气水汽分布对区域天气和气候有很大影响,为了探讨探空观测的大气水汽总量(*R*)资料的可靠性,本文以地基GPS遥感的大气水汽总量(*G*)为参照标准,对拉萨(1999~2010年)和那曲(2003年)的*R*进行对比分析和偏差(*R*-*G*)订正。结果表明:近10多年拉萨站*R*比*G*明显偏小,偏小程度随使用不同的探空仪而异。GZZ-2型机械探空仪和GTS-1型电子探空仪多年平均的PW偏差分别为-8.8%和-3.9%,随机误差分别为17.6%和13.6%。近10多年PW偏差变化呈减少趋势,这与探空仪性能改进有关。分析发现,青藏高原PW偏差具有明显季节变化和日变化特征,夏季比冬季明显,1200 UTC比0000 UTC明显。拉萨站GZZ-2型和GTS-1型探空仪在1200 UTC多年平均的PW偏差分别为-15.8%和-7.3%,在0000 UTC分别为-1.6%和-0.4%。那曲站GZZ-2型探空仪在1200 UTC和0000 UTC的PW偏差分别为-12.4%和-0.3%。分析还表明,太阳辐射加热与气温的日变化和季节变化是造成高原PW偏差订正,订正后的PW系统偏差显著减少,随机误差也相应得到了改善。

关键词 大气水汽总量 (PW) 探空 地基GPS 偏差订正 青藏高原
 文章编号 1006-9895(2012)04-0795-16
 中图分类号 P412
 文献标识码 A
 doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2011.11149

# Systematic Errors and Their Calibrations for Radiosonde Precipitable Water Vapor on the Tibetan Plateau

LIANG Hong<sup>1, 2</sup>, ZHANG Renhe<sup>1</sup>, LIU Jingmiao<sup>1, 3</sup>, SUN Zhian<sup>4</sup>, and LI Shikui<sup>1</sup>

1 Chinese Academy of Meteorological Science, Beijing 100081

2 Graduate University of Chinese Academy of Science, Beijing 100049

3 Institute of Atmospheric Environment, China Meteorological Administration, Shenyang 110016

4 Centre for Australian Weather and Climate Research, Australian Bureau of Meteorology, Melbourne, Australia

**Abstract** Water vapor is one of the major components of the atmosphere and material resource for rainfall. The spatial distribution and temporal variation of precipitable water vapor on the Tibetan Plateau play an important role in the regional weather and climate. The reliability of precipitable water vapor measurements is greatly of concern. The characteristics of the systematic and random errors of the radiosonde (RS) precipitable water (PW) data by comparison

作者简介 梁宏,男,1978年出生,博士研究生,主要从事东亚季风研究。E-mail: liangh@cams.cma.gov.cn

收稿日期 2011-08-24, 2011-12-23 收修定稿

**资助项目** 国家自然科学基金资助项目 40905038、40921003、40775020

通讯作者 刘晶淼, E-mail: jingmiaol@cams.cma.gov.cn

with ground-based GPS measurements are studied at Lhasa during the period from year 1999 to 2010 and at Naqu in year 2003. The results show that the radiosonde PW is significantly drier than GPS PW at Lhasa during a period of more than one decade. Different types of radiosonde humidity sensors show different magnitudes of PW dry biases. GZZ-2 (goldbeater's skin hygrometer) and GTS-1 (carbon hygristor) have relative mean dry biases of -8.8% and -3.9% and relative mean random errors of 19.8% and 13.6%, respectively. Due to the introducing of the high performance humidity sensors (GST-1), the relative PW difference is apparently reduced over the past 10 years. The temporal variation characteristics of the radiosonde PW dry bias are also investigated. The results show that the radiosonde PW dry bias exhibits pronounced diurnal and annual variations. The dry bias of the radiosonde PW is much larger at 1200 UCT than that at 0000 UTC, and larger in summer than that in winter. The relative mean PW biases for GZZ-2 and GTS-1 are respectively -15.8% and -7.3% at 1200 UTC, and -1.6% and -0.4% at 0000 UTC at Lhasa. The relative mean PW bias for GZZ-2 is -12.4% at 1200 UTC, and -0.3% at 0000 UTC at Naqu. Additionally, the causes of diurnal and annual variations of the radiosonde PW dry bias are analyzed. The solar radiative heating to the humidity sensors may have played an important role in the radiosonde PW dry bias diurnal and annual variations. It can be seen that the diurnal variations of the radiosonde PW dry bias are significant partly because the air temperature is higher at 1200 UTC than that at 0000 UTC. The annual variations of the radiosonde PW dry bias are pronounced partly because the air temperature is higher in summer than that in winter. The calibration methods for the radiosonde PW dry bias are developed and applied to the GZZ-2 and GTS-1 sounding PW datasets at Lhasa and Nagu. The corrections greatly improve the accuracy of the radiosonde PW.

Key words precipitable water vapor (PW), radiosonde, ground-based GPS, systematic error calibration, Tibetan Plateau

# 1 引言

水汽是大气的主要成分和降水的主要物质来 源,它是大气物理过程和现象的主要角色。大气水 汽含量的变化及时空分布特征显著影响着太阳辐射 传输和热量平衡以及大气环流和天气气候状况。青 藏高原(简称高原)是地球表面隆起的一个庞大自 然体,平均海拔高度约 4000 m,而实际有效高度却 可达 6000~7000 m。高原大尺度地形对气流起了阻 挡作用、分流作用和引导作用。高原东南侧把来自 印度洋的丰沛暖湿气流阻隔抬升,形成了全球降水 量最多的中心地带;而极地干冷空气受阻于高原北 侧,使得高原西北成为干旱少雨区。高原大气水汽 分布对区域天气气候有很大影响 (Ye and Wu, 1998; Xu et al., 2008; 占瑞芬和李建平, 2008; 李生辰等, 2009; 施晓晖等, 2009), 其探测资料的可靠性令人 关注 (梁宏等, 2006; Liu et al., 2006; 梁宏等, 2012)。 据有关研究 (Takagi et al., 2000; Liu et al., 2005), 高原无线电探空(RS)探测的大气水汽总量(PW) 存在明显"干偏差"。目前, PW 探空观测主要存在 三种类型的误差(Wang and Zhang, 2008): 仪器系 统误差、时空分布非均匀性误差 (由探空传感器性 能不同或不稳定等因素所造成)和日采样频率低造 成的误差。系统误差主要源于探空传感器性能的不 足,如传感器被污染、未校正、感应时间滞后或由 其它物理因素所造成。20世纪末和21世纪初高原上应用最多的探空仪是59型机械电码式探空仪(GZZ-2),其探测性能与发达国家同时代通用探空仪有较大差距。从2002年1月开始我国推广使用国产L波段电子探空仪(GTS-1),以替代59型探空仪。GTS-1与Vaisala-RS80探空仪的测量精度相当,达到了20世纪90年代中期国际先进水平(Li,2006;李伟等,2009),但GTS-1的相对湿度探空曲线仍然存在较大的干偏差(姚雯等,2008;李伟等,2009)。

基于全球定位系统(GPS)遥感大气水汽总量 是 20 世纪 90 年代发展起来的一门大气遥感技术, 它的基本原理建立在GPS 定位技术和大气折射理论 的基础上(Elgered et al., 1991; Bevis et al., 1992, 1994)。地基 GPS 遥感的大气水汽总量 (G) 具有高 时间分辨率(几分钟)、较高精度、全天候、自校准 和长期稳定等优点(李成才等,1999;李成才和毛 节泰, 2004; Wang et al., 2007; Byun and Bar-Sever, 2009), G 的精度接近于微波辐射计探测结果的精 度,优于探空观测结果 (R) 的精度 (Liou et al., 2001; Guerova et al., 2005; Sapucci et al., 2005; van Baelen et al., 2005; 毕研盟等, 2006; Cady-Pereira et al., 2008), 有关微波辐射计遥感探测 PW 的原理和 方法请参考有关文献(Hogg et al., 1983; Liou et al., 2001; 刘红燕等, 2009)。Liu et al. (2005)比较了 高原那曲站微波辐射计(WVR)、探空和地基 GPS 探测的 PW,结果表明 G 与 WVR 的探测结果很接近,而 R 与 WVR 的探测结果之间的一致性略差一些。由于具有精度较高和时间序列较均匀等特点,G 已被广泛应用于验证探空、卫星遥感和数值模式输出等结果(Liu et al., 2005; Bock et al., 2007; Wang and Zhang, 2008; Vey et al., 2010)。本文基于高原拉萨和那曲站的相关资料,以地基 GPS 遥感的大气水汽总量(G)为对比参照,初步分析近 10 多年(1999~2010年)高原 R 偏差的变化特征及其主要成因,并初步探讨 R 偏差的订正方法。

## 2 资料和方法

#### 2.1 测站位置及探测仪器

拉萨(29.67°N, 91.13°E)和那曲(31.48°N, 92.06℃)位于高原中部,属于高原亚干旱区。拉萨 探空站(3650 m)位于西藏自治区气象局大院内, 是高原上最早开展探空观测的站点之一。地基 GPS 站(站号 lhas 或 lhaz, 3650 m)安装在西藏自治区 测绘局楼顶,是 IGS (International Global Navigation Satellite System (GNSS) Service, 国际全球导航卫 星系统服务)在高原上的唯一基准站,从1997年2 月开始运行,与探空站的水平距离约3km。那曲地 基GPS站和探空站均位于那曲气象局气象观测站内 (4477 m), 该站是在 2000 年 9 月开始实施的"中一 日合作青藏水循环长期合作观测计划"项目资助 下所建。Wang and Zhang (2008) 指出地基 GPS 站 与探空站之间的水平距离在 50 km 之内,海拔高 度之差小于 100 m 时,可对两站探测的 PW 进行比 较。表1给出了拉萨和那曲 GPS 和 RS 站的设备信 息。从 2002 年 5 月至 2007 年 2 月拉萨 GPS 站有两 台双频地基 GPS 接收机并行开展观测。2004 年 12 月之前拉萨 RS 站采用 GZZ-2 型探空仪,从 2005 年1月开始采用 GTS-1 型探空仪。GZZ-2 型探空仪

是我国从 1960 年代开始采用的一种机械电码式探 空仪,其使用量已超过 500 万套,是 20 世纪全球应 用最广泛的探空仪之一(陶大文,1997)。GTS-1 型探空仪是数字式电子探空仪,是我国近几年推广 应用的探空仪。那曲站的地基 GPS 观测从 2000 年 9 月开始,所用设备为双频地基 GPS 接收机,本研究 采用了那曲 2003 年的 GPS 资料。

#### 2.2 地基 GPS 遥感的 PW 资料

全球定位系统 (GPS) 是由约 30 颗卫星组成的 卫星系统,这些卫星分别在6个轨道面上运行,并向 全球各地发送 L 波段无线电信号。这些无线电信号 从 GPS 卫星传输到地基 GPS 接收机时会受到大气的 折射而延迟,即大气延迟,根据大气延迟可精确反演 PW (Bevis et al., 1992, 1994; Rocken et al., 1993, 1997)。拉萨GPS站的天顶对流层总延迟 (ZTD)从IGS 网站下载 [FTP://cddis.gsfc.nasa.gov/gps/products/trop (2011-03-10)],所用处理软件为 GIPSY-OASIS II (Webb and Zumberge, 1997; Byun and Bar-sever, 2009)。这些 ZTD 数据误差约 1.5~5 mm,即对应的 PW 反演误差约 0.23~0.75 mm (Bevis et al., 1994)。 本文采用拉萨站 1999~2010 年的 ZTD 资料, 其中 1998~2000年资料时间分辨率为2小时,2001~2010 年资料时间分辨率为5分钟。通过线性插值方法将 这些资料插值为时间分辨率 30 分钟的 ZTD 时间序 列。对于那曲站 2003 年的 GPS 资料,采用 GAMIT 软件 (10.31 版本) (Herring et al., 2006) 处理, 解算 出每 30 分钟的 ZTD 时间序列。利用 GAMIT 软件 解算的 ZTD 与 IGS 提供的 ZTD 精度基本相当 (Iwabuchi et al., 2004; Pacione and Vespe., 2008)。再 根据本站气压计算出静力延迟 (ZHD) (Saastamoinen et al.,1973; Elgered et al., 1991), ZTD 减去 ZHD 就 得到天顶方向由水汽造成的 GPS 信号延迟 (ZWD, 即天顶对流层湿延迟)。根据拉萨和那曲近 20 年的

表 1	抷	萨杜那曲地基 GPS 与 RS 站的设备信息
Table	1	Equipment information of ground-based GPS and radiosondes at Lhasa and Nag

站名	GP	PS 站	RS 站		
	接收机型号	运行时间	探空仪型号	运行时间	
拉萨	AOA SNR-8000ACT 双频 IGS 编号: NO.21613M001 站名: lhas	1997年2月~2007年2月	GZZ-2(59 型机械电码式探空仪) 湿敏感元件: 肠衣	1967年1月~2004年12月	
	TPS E-GGD 双频 IGS 编号: NO.21613M002 站名: lhaz	2002年5月	GTS-1(数字式电子探空仪) 湿敏感元件:碳湿敏电阻	2005年1月	
那曲	ASHTECH Z-12 双频	2000年9月~2004年4月	GZZ-2	1970年5月~2005年9月	

探空资料拟合了高原大气平均温度(*T*<sub>m</sub>)和地面气温(*T*)的线性经验关系式,

$$T_{\rm m} = 0.686T + 77.88 \,, \tag{1}$$

式中 $T_m$ 和T的单位均为 K。具体方法参考李建国等 (1999)。再根据 ZWD 和 $T_m$ 就能反演出每 30 分钟间 隔的 G 资料 (Bevis et al., 1994)。本文采用的地面 气压和气温的观测精度分别为 ±0.1 hPa 和 ±0.1℃, 气压和气温给 G 反演带来的误差可以忽略不计 (Liu et al., 2005)。

静力延迟 (ZHD) 的计算公式 [Elgered et al. (1991) 中的公式 (1)] 是在大气满足静力平衡 条 件下积分得出。如果大气不处于静力平衡状态, ZHD 的计算结果会产生 0.01%左右的误差,对应 0.2 mm 左右的天顶距,极端情况下达到几毫米 (Elgered, 1993)。根据 ZWD 和 PW 之间的转换关 系 (Bevis et al., 1994), 1 mm 的 ZWD 对应的 PW 约 0.15 mm,因此,大气不处于静力平衡状态造成的 PW 计算误差约 0.03 mm,几乎可以忽略不计,极端情况下亦小于 1 mm。G 资料可用于气候研究、卫星遥感或其它相应地面观测结果标定 等 (Wang and Zhang, 2008; Vey et al., 2010)。因此, G 可作为观测站点 PW 的基准值,从而用于分析 *R* 的误差。

#### 2.3 探空及其它气象资料

拉萨和那曲站探空气象观测为每天两次[00时 和12时(协调世界时,下同)],探空气球施放时间分 别为23:15和11:15,飞升时间一般为90 min (中国气 象局,2010)。无线电探空仪由气球携带一般按5~8 m/s的速率上升,这种上升速率允许以适时的方式完 成探测——即约40 min升达16 km和约90 min升达 30 km以上高度(中国气象局监测网络司, 2005)。 因此,对PW的计算而言,前45分钟的探空观测资料 是主要的。探空资料提供的变量包括各标准层的气 压、高度、温度、温度露点差、风向和风速。本研 究的探空资料自美国NCDC (the National Climatic Data Center) 的IGRA (the Integrated Global Radiosonde Archive) 数据库[ftp://ftp.ncdc.noaa.gov/pub/data/igra (2011-03-10)],该数据集已经过严格质量控制 (Durre et al., 2006)。为了准确计算高海拔地区的探空观测 PW(R),研究采用如下计算方法(例如,Bolton, 1980; Wang and Zhang, 2008),

$$R = \frac{1}{g} \int_0^{p_s} q \mathrm{d}p \,, \tag{2}$$

$$q = \frac{\varepsilon e}{p - (1 - \varepsilon)e}, \qquad (3)$$

$$e = 6.112 \exp\left(\frac{17.67T_{\rm d}}{T_{\rm d} + 243.5}\right),$$
 (4)

$$T_{\rm d} = T - \Delta T , \qquad (5)$$

其中, g为地球重力加速度(单位: m/s<sup>2</sup>), q为 比湿(单位: kg/kg),  $p_s$ 为地面气压(单位: Pa), e为水汽压(单位: hPa), p为气压(单位: hPa),  $T_d$ 为露点温度(单位:  $\mathbb{C}$ ), T为气温(单位:  $\mathbb{C}$ ),  $\Delta T$ 为温度露点差(单位:  $\mathbb{C}$ ),  $\varepsilon$ =0.622。从而, R 的单位为mm。由于高原的海拔高度几乎到了对流层 中部,计算R所用的探空廓线资料最低要观测至200 hPa, 且至少要有五个标准层。研究采用的探空资料 中绝大部分的探空廓线都达到200 hPa, 探测层数达 到五层以上。逐时地面气温和气压资料来自中国气 象局国家气象信息中心,这些资料经过了质量控制。 气温和气压线性插值为每30分钟的时间序列, 用于 计算G。

## 3 结果分析

## 3.1 探空观测PW偏差的变化特征

图1给出了1999~2010年拉萨月平均PW偏差 的变化情况,PW偏差是指相同时刻R减去G之差。 从图1a、b可见,近10多年R比G系统偏小,且PW 总偏差变化呈逐年减弱趋势,从1999年-1.28 mm (-12.7%) 减弱至2010年-0.34 mm (-3.3%)。PW 总偏差具有年变化特征,夏季比冬季明显。GZZ-2 探空仪的PW总偏差比GTS-1探空仪的更明显。 夏季GZZ-2的月平均PW总偏差约-2.0mm,最小可 达-3.2 mm。夏季GTS-1的月平均PW总偏差约 -1.0 mm, 最小可达-1.4 mm。从图1c、d可见, 近 10多年00时的PW偏差正负值出现的频率大致相 当,并且明显小于总偏差和12时的偏差(图1e、f)。 GZZ-2探空仪在00时的PW偏差也比GTS-1探空仪 的更明显。GZZ-2探空仪在00时的PW偏差变化范 围在-2~2 mm之间,而GTS-1探空仪PW偏差的变 化范围更小一些,约在-1~1mm之间。从图1e、f 可见,近10多年12时的PW偏差也基本为负值,R比 G明显偏小。与PW总偏差和00时的PW偏差相 比,12时的PW偏差最明显。近10多年12时的PW偏 差也有明显减弱趋势,从1999年-1.93 mm (-19.1%)



图1 1999~2010年拉萨GZZ-2探空仪 (a、c、e)和GTS-1探空仪 (b、d、f)月平均PW偏差变化: (a、b)总偏差(00时和12时); (c、d)00时; (e、f)12时 Fig.1 Time series of the monthly mean precipitable water (PW) differences (RS minus GPS) by radiosonde (RS) humidity sensors (a, c, e) GZZ-2 and (b, d, f) GTS-1 at Lhasa during the period from 1999 to 2010: (a, b) Total (0000 UTC and 1200 UTC); (b) 0000 UTC; (c) 1200 UTC

减小至2010年-0.53 mm (-5.7%)。12 时的PW偏差 也有明显年变化特征,夏季比冬季明显。夏季GZZ-2 的月平均12时的PW偏差约-2~-3 mm,最小可达 -4 mm。夏季GTS-1的月平均12时的PW偏差约 -1~-2 mm,最小可达-2.8 mm。可见,拉萨站的PW 偏差具有年变化和年际变化的特征,且GZZ-2的 PW偏差比GTS-1的PW偏差更明显。PW偏差逐年减 小,其原因除了探空仪更新换代之外,可能还与同 一型号探空仪的生产工艺不断改善等有关 (陶大 文,1997;李伟等,2009),有待进一步研究。

图2给出了拉萨站PW相对偏差的变化。PW 相对偏差是指PW偏差占G的百分比。从图2可以看 出,PW相对偏差是不稳定的,而是随着季节的变化, 冬季大,夏季小。虽然冬季的PW偏差较小,但实际 的PW也较小,因而相对偏差会较大。对于GZZ-2而 言(图2a),总体、00时和12时的相对偏差分别约 -35%~0%、-30%~15%和-60%~0%。对GTS-1而言 (图2b),总体、00时和12时的相对偏差分别约 -20%~0%、-10%~10%和-30%~0%。可见,GTS-1 的探测性能明显优于GZZ-2。

由图3可见,那曲站PW总偏差和12时的偏差都 基本为负值,即R比G小。PW总偏差和12时的偏差 都具有明显的年变化特征,夏季比冬季明显。PW 总偏差约0~-1 mm,12时的PW偏差约-1.8~0 mm, 而00时的PW偏差却很小,约-0.2~0.2 mm。那曲 站也是12时的PW偏差最明显,PW总偏差次之,00 时的PW偏差最不明显。在那曲站,对GZZ-2而 言,总体、00和12时的相对偏差分别约-10%~0、 -5%~5%和-30%~0(图略)。 以上分析表明,与G相比,拉萨和那曲站的R偏小,说明探空对大气湿度的观测偏干。PW偏差还具有年际变化、年变化和日变化特征,夏季比冬季明显,12时比00时明显。

PW偏差的长期均值能很好地代表R的系统误差。从表2可见,在拉萨站对于GZZ-2型机械探空仪而言,总体、00时和12时的系统偏差分别为-8.8%、-1.6%和-15.8%。对于GTS-1型电子探空仪而言,总体、00时和12时的系统偏差分别为-3.9%、-0.4%和-7.3%。显然R的系统偏差与探空仪的类型密切相关,GTS-1型电子探空仪比GZZ-2型机械探空仪的精度提高了一倍,这也证明了国产探空仪研制水平的显著提高。t检验 (魏凤英,2007)结果表明,在 $\alpha$ =0.05的显著性水平上,两种探空仪的总体和12时的系统偏差都是显著的,而00时的系统偏差都不



Fig. 2 Time series of the monthly mean relative PW differences by radiosonde humidity sensors (a) GZZ-2 and (b) GTS-1 at Lhasa during the period from 1999 to 2010



图3 2003年那曲探空仪GZZ-2月平均PW偏差: (a) 总偏差 (00时和12时); (b) 00时; (c) 12时

Fig. 3 Time series of the monthly mean PW difference by radiosonde humidity sensor GZZ-2 at Naqu in year 2003: (a) Total (0000 UTC and 1200 UTC); (b) 0000 UTC; (c) 1200 UTC

显著。在那曲GZZ-2的总体、00时和12时的系统偏 差分别为-6.6%、-0.3%和-12.4%。t 检验结果表 明,在α=0.05的显著性水平上,那曲GZZ-2的总体 和12时的系统偏差都是显著的,而00时的系统偏差 不显著。以上分析表明,高原R的偏差主要出现在 12时。PW偏差的标准差能很好的代表探空的随机误 差(Wang and Zhang, 2008)。拉萨GZZ-2探空仪总 体、00时和12时的PW偏差的标准差分别为17.6%、 15.1%和16.9%。GTS-1探空仪总体、00时和12时的 PW偏差的标准差分别为13.6%、11.4%和14.6%。那 曲GZZ-2探空仪总体、00时和12时的PW偏差的标准 差分别为14.5%、11.9%和13.9%。可见,GTS-1比 GZZ-2型探空仪更稳定。表2中那曲GZZ-2的PW偏差 和标准差比拉萨的小一些,这与所用资料长度和两

表2 探空仪GZZ-2和探空仪GTS-1的PW偏差比较

Table 2Statistic results of PW bias by radiosondehumidity sensors GZZ-2 and GTS-1 at Lhasa and Naqu

站点	年份	探空仪	时间	系统侦	副差	标准差
拉萨	1999~2004	GZZ-2	总体	$-0.87~\mathrm{mm}^*$	(-8.8%)	1.74 mm (17.6%)
			00时	-0.16 mm	(-1.6%)	1.49 mm (15.1%)
			12时	$-1.57 \text{ mm}^*$	(-15.8%)	1.67 mm (16.9%)
	2005~2010	GTS-1	总体	$-0.37~\mathrm{mm}^*$	(-3.9%)	1.20 mm (13.6%)
			00时	-0.03 mm	(-0.4%)	1.00 mm (11.4%)
			12时	$-0.68~\mathrm{mm}^{*}$	(-7.3%)	1.28 mm (14.6%)
那曲	2003	GZZ-2	总体	$-0.45~\mathrm{mm}^{*}$	(-6.6%)	0.99 mm (14.5%)
			00时	$-0.02 \mathrm{~mm}$	(-0.3%)	0.81 mm (11.9%)
			12时	$-0.85~\mathrm{mm}^*$	(-12.4%)	0.95 mm (13.9%)

注:括号中的数值表示相对偏差,相对偏差=(RS结果-GPS结果)/GPS结果>/GPS结果>/GPS结果>/00%(下同);\*表示通过0.05显著性检验。

站 PW 大小等不同有关, 仔细比较 2003 年两站 PW 偏差的变化及量级, 两站 PW 偏差基本一致(图 le 和图 3c), 这说明在高原上 GZZ-2 的 PW 偏差具有一定的共性。综上所述, 近 10 多年高原 GZZ-2 和 GTS-1 的 PW 偏差都是在 12 时的显著, 而在 00 时 不显著。

801

由图4可见,对逐个观测时次而言,GZZ-2的 PW 偏差最小值在00时和12时分别达-6 mm (-60.6%)和-8 mm (-80.8%)(图4a),GTS-1的PW 偏差最小值在00时和12时分别达-4 mm (-40.4%)和 -6 mm (-60.6%)(图4b)。GTS-1的PW偏差频率分布 比GZZ-2的更集中,进一步说明了GTS-1比GZZ-2的 探测精度更高。两种探空仪的PW偏差无论在00时或 12时几乎都以均值为中心对称分布,都是单峰型。 从PW偏差频率的分布型几乎不变和峰值中心的移 动可以看出,12时的PW偏差比00时的更明显。t检 验结果表明,两种探空仪的PW系统偏差在00时和12 时的差别都是显著的。那曲站的分析结果也表明 GZZ-2的PW系统偏差在00时和12时的差别是显著 (图略)。这些结果进一步说明高原PW偏差在12时比 00时的更明显。

#### 3.2 PW偏差的原因

造成 PW 偏差的因素有:不同的探测方式(与 设备的测量精度无关)、测站间的距离、GPS 设备测 量误差和探空仪器测量误差等。

从探测方式来看,GPS 探测的是信号从卫星传播到接收机所经路径的大气,大气造成的信号延迟 是在分层各向均匀大气的假设下投影到站点的天顶 方向,从而获得天顶对流层总延迟。GPS 反演 PW 时都用到至少 4 颗以上仰角高于 10° 的卫星,考虑





10 km 高的水汽层,其水平探测半径在 20~30 km 的量级。探空探测的是探空气球运动轨迹上的值,由于水平气流的作用,探空气球从地面上升到 10 km 高度,会水平飘移 20 km 左右。水平飘移造成的 PW 误差是很难估计的,因为它与大气的不均匀程度 有关。因此,GPS 和探空探测的大气范围是相当的, 两者都受到大气水汽水平分布不均匀的影响。而大 气水汽水平分布不均匀造成的 PW 偏差往往是随机 的,在大样本量的条件下(拉萨和那曲的数据样本 量分别约 6000 和 700)不会造成系统性偏差。

从资料获取来说,GPS提供的是整层大气延迟,探空所能提供的只有标准层次。这种差别可能会造成R比G系统偏低,但从PW偏差的年际变化情况来看,探空探测层次少只是次要原因。

从测站间的距离来说, 拉萨的地基 GPS 站和探 空站相距 3 km, 距离上的差别可能会造成一些偏 差, 但两站都处于相同的城市下垫面, 站点上空大 气的性质相差不大, 在大样本的条件下也不会造成 系统性偏差。那曲的地基 GPS 站和探空站相距仅十 几米, 也不会因为距离造成系统性偏差。

从 GPS 设备测量误差来说,对于 GPS 测量误 差, IGS 考虑了不同的卫星信号高度截角、投影函 数、解算参数的约束方案和接收机更换等因素对对 流层总延迟(ZTD)解算误差的影响。从 2002 年 5 月开始,拉萨站安装了新的地基 GPS 接收机(TPS E-GGD),并与原有地基 GPS 接收机(AOA SNR-8000ACT)并行观测近5年。图5给出了2002 年5月至2007年2月拉萨站两种不同地基GPS接 收机观测的 ZTD 比较。两种接收机观测的 ZTD 平 均偏差仅 0.58 mm (0.04%),均方根误差(RMSE) 为2.93 mm (0.19%),小于ZTD本身的误差(4 mm), 两序列相关系数 (r) 为 0.9983。可见, 两种接收机 的观测结果具有很好的一致性,这说明接收机更换 之后 ZTD 时间序列仍然是均一时间序列。因此,本 研究所用的 ZTD 资料具有很好的均一性和较高的 精度,不会造成 PW 系统性偏差。

从探空仪器测量误差来看,R比G系统偏小反 映了探空仪探测的相对湿度偏干。探空可能因为湿 度传感器灵敏度不够造成探空仪在进入云层高湿区 时不能达到饱和,飞出云层时降湿变化滞后(邢毅 等,2009)。在探空气球飞升中由于传感器受污染等 原因致传感器反应时间系数太长,会限制无线电探 空仪对对流层相对湿度测量的可靠性(中国气象局



图5 拉萨两种不同地基GPS接收机观测的天顶对流层总延迟散点图。虚 线为对角线

Fig.5 Scatter plot of zenith tropospheric delays (ZTDs) retrieved by two different ground-based GPS receivers. The dotted line is diagonal line

监测网络司,2005)。近十多年,拉萨 PW 偏差逐年 减弱以及探空仪更换对 PW 偏差的明显改善也表明 探空仪的测量结果存在误差。以上分析表明,探空 仪测量误差是导致高原 PW 偏差的主要原因。

#### 3.3 探空仪器测量误差的影响因子

## 3.3.1 太阳辐射的影响

据有关研究 (Guerova et al., 2005; Sapucci et al., 2005; van Baelen et al., 2005; Cady-Pereira et al., 2008),国际上一些先进探空仪(如Vaisala RS80-A、RS80-H等) 探测的PW系统偏差是白天比夜间明显,原因是白天太阳辐射对湿度探头加热,造成探测的相对湿度偏小。另外,太阳辐射加热还能造成温度测量结果误差,对于这类误差,热敏元件的制造商已提供专门的订正公式 (WMO, 2008; 中国气象局, 2010)。在完成探空报文的过程中,温度的辐射加热误差订正结果还存在一定的不确定性,但已不是主要影响因素(WMO, 2008)。李伟等(2009)研究指出,在200 hPa以下GTS-1型探空仪探测的相对湿度随高度增加干偏差逐渐明显,而温度的探测结果则较为合理。

观测结果表明,拉萨(图6a)和那曲(图6b) 太阳总辐射在12时比00时强很多。12时最大太阳总 辐射在拉萨和那曲分别约为350 W/m<sup>2</sup>和360 W/m<sup>2</sup>, 而00时的最大值只有约50 W/m<sup>2</sup>和60 W/m<sup>2</sup>,显然两 个时刻的太阳总辐射差别很大,从而太阳辐射加热 造成的湿度测量误差也会不同。但地面观测的太阳 总辐射会受到云的强烈影响,因此用太阳天顶角的 变化表征太阳总辐射的变化较合适。相关研究 (Cady-Pereira et al., 2008;中国气象局,2010)表 明湿度测量的系统误差对太阳天顶角的变化是敏感 的。12时探空观测的探空气球正点施放时间为 11:15,因此太阳辐射加热对探空相对湿度观测量的 影响应从11:15开始。由图7可见,拉萨站两种探空 仪的R误差与太阳天顶角的变化有较好的线性正相 关关系,GZZ-2(图7a)和GTS-1(图7b)的R误差 与太阳天顶角的相关系数分别为0.305和0.277,都通 过信度 $\alpha$ =0.01显著性检验。那曲站GZZ-2的R误差 与太阳天顶角的相关系数为0.399(图8),通过信度  $\alpha$ =0.01显著性检验。以上分析表明,太阳辐射越 强,PW偏差也就越明显。 由图9可见, 拉萨站两种探空仪在12时的平均 PW偏差都随着太阳天顶角的增大而减弱, 显然太阳 辐射加热对PW偏差有重要影响。两种探空仪相比, GZZ-2在12时的PW偏差随太阳天顶角的变化范围 在-2~-1 mm之间(θ≤90°)(图9a), GTS-1在12 时的PW偏差随PW的变化范围在-1~-0.1 mm之间 (θ≤90°)(图9b)。可见, 太阳辐射对GZZ-2的探测偏 差影响更大,也说明GTS-1的探测精度比GZZ-2的更 高。值得注意的是, 当 θ>90°时(太阳总辐射约为 0), 平均PW误差并不为0, 而是随着 θ的增大而减 小, 且最终并不为0。显然太阳辐射加热不是造成 PW误差的唯一原因。从图10可见, 那曲站12时的 平均PW偏差也随着太阳天顶角增大而减小,变化范 围在-1.0~0mm之间(θ≤90°), 当太阳天顶角大于



图6 2004年1月1日~2008年12月31日00时和12时太阳总辐射时间序列图: (a) 拉萨; (b) 那曲

solid lines represent linear trends

Fig.6 Time series of global solar radiation observations at 0000 UTC and 1200 UTC during the period from 1 Jan 2004 to 31 Dec 2008 at (a) Lhasa and (b) Naqu



图7 拉萨12时 (a) GZZ-2探空仪和 (b) GTS-1探空仪的PW偏差与11:15太阳天顶角 (θ) 散点图。实线为趋势线 Fig.7 Scatter plots of PW differences by radiosonde sensors (a) GZZ-2 and (b) GTS-1 at 1200 UTC vs solar zenith angles (θ) at 1115 UTC at Lhasa. The

90°时,平均PW偏差几乎为0。可见,拉萨和那曲站 相同型号探空仪(GZZ-2)的平均PW偏差与太阳天 顶角的关系并不一致,有待进一步研究。

3.3.2 PW大小的影响

从图11可见, 拉萨两种探空仪在12时的PW偏差 都随着PW增大而越明显。两种探空仪相比, GZZ-2 在12时的PW偏差随PW的变化较陡, 变化范围在 -3.6~0 mm之间, 主要维持在-2 mm左右(图11a)。 GTS-1在12时的PW偏差随PW的变化较平缓, 变化 范围在-2.0~0 mm之间, 主要维持在-1 mm左右 (图11b)。这也说明GTS-1的探测精度比GZZ-2更高。



图8 那曲12时GZZ-2探空仪的PW偏差与11:15太阳天顶角(θ)散点图。 实线为趋势线

Fig. 8 Scatter plot of PW differences by radiosonde sensor GZZ-2 at 1200 UTC vs solar zenith angle ( $\theta$ ) at 1115 UTC at Naqu. Solid line represents the linear trend

那曲站GZZ-2在12时的PW偏差也随着PW增大而越 明显,变化范围在-2.0~0.0 mm之间(见下述图 13a)。图12给出了拉萨近10多年00时和12时月平均 G的变化,可以看出00时和12时的G的大小基本一 致。在那曲站也是如此(图略)。可见,PW大小并 不是造成PW偏差的原因。

3.3.3 气温的影响

从图14可见,拉萨两种探空仪在12时的PW偏差 都随着气温增大而越明显。GZZ-2的PW偏差随气温 的变化较陡,变化范围在-2.5~0 mm之间 (图14a)。 GTS-1的PW偏差随PW的变化较平缓,变化范围在 -1.5~0 mm之间,在气温低于17℃时,PW偏差维 持在-1.0~0 mm之间(图14b)。这也说明GTS-1 的探测精度比GZZ-2更高。那曲站GZZ-2在12时的 PW偏差也随气温增大而越明显,变化范围在-2.0~ 0 mm之间(图13b)。相关研究(中国气象局监测网 络司,2005; WMO,2008) 指出,大多数相对湿度 传感器的校准与温度有关。由图15可见,拉萨和那 曲12时的月平均地面气温比00时的分别高出6~ 12℃和6~14℃。根据式 (1),地面气温越高大气平 均温度也就越高, 地面气温的变化能间接反映大气 平均温度的变化。对12时的PW偏差和地面气温做相 关分析的结果(图略)表明,对GZZ-2而言,在拉 萨和那曲的相关系数分别为-0.283和-0.468,对 GTS-1而言,在拉萨的相关系数为-0.251,都通过信 度 $\alpha = 0.05$ 显著性检验。可见,大气温度越高,PW 偏差也就越明显。12时的气温比00时的高是PW偏差 前者比后者大的另一原因。同样, 夏季的气温比冬



图9 拉萨12时 (a) GZZ-2探空仪和 (b) GTS-1探空仪的平均PW偏差随11:15太阳天顶角 (θ) 的变化。每隔2°求一次PW偏差的平均值,误差棒表示 标准差(下同)

Fig.9 Averaged PW differences as a function of solar zenith angle at 1115 UTC in each 2-degree solar zenith angle bin for radiosonde sensors (a) GZZ-2 and (b) GTS-1 at 1200 UTC at Lhasa. Error bars represent standard deviation (the same below)

3

2

1

ſ

R-G/mm

GZZ-2

季的高应是造成夏季PW偏差较大的另一原因。综上 所述,气温日变化和季节变化是造成高原探空PW偏

-3 [<u>-3</u> 70° 75° 80° 85° 90° 95°  $\theta$ 图10 那曲12时GZZ-2探空仪的平均PW偏差随11:15太阳天顶角( $\theta$ )

图10 那田12时GZZ-2孫至仅的平均PW偏差随11:15太阳大坝角(θ) 的变化。每隔2°求一次PW偏差的平均值

Fig. 10 Averaged PW differences as a function of  $\theta$  (solar zenith angle) at 1115 UTC in each 2-degree  $\theta$  bin for GZZ-2 radiosondes at 1200 UTC at Naqu

差的重要原因。

#### 3.4 PW误差订正

前文分析指出,太阳辐射加热和地面气温的日变化和季节变化是造成高原12时的PW偏差的重要原因。因此,试图建立PW偏差与太阳天顶角和地面气温之间的经验关系式,并根据该经验关系式订正高原的PW偏差。首先,对平均PW偏差随太阳天顶角的变化进行多项式拟合,然后,再建立平均剩余PW偏差与地面气温的经验公式。由于拉萨和那曲站PW偏差的变化有所不同,因此针对两站的PW偏差分别建立经验订正关系式。12时的PW偏差订正方程如下,

$$R_c = R - \Delta R_c \tag{6}$$

$$\Delta R_{\rm c} = \begin{cases} a_0 + a_1 \theta + a_2 \theta^2 + a_3 \theta^3 + f(T) & (\theta < 90) \\ f(T) & (\theta \ge 90) \end{cases}$$
(7)

式中,  $R_c$ 为订正后的探空PW(单位: mm), R探 空观测结果;  $\Delta R_c$ 为PW偏差订正量,为负值;  $\theta$ 为 11:15太阳天顶角[单位: (°)], T为地面气温(单



图11 拉萨12时 (a) GZZ-2探空仪和 (b) GTS-1探空仪的平均PW偏差随G的变化。每隔2 mm求一次PW偏差的平均值

Fig.11 Averaged PW differences as a function of G in each 2-mm PW bin for radiosonde sensors (a) GZZ-2 and (b) GTS-1 at 1200 UTC at Lhasa





Fig.12 Time series of monthly mean G at 0000 UTC and 1200 UTC during period from 1999 to 2000 at Lhasa



图13 那曲12时月平均PW偏差随G (a) 和气温 (b) 的变化。在图 (a) 中每隔2 mm求一次PW偏差的平均值,在图 (b) 中每隔2℃求一次PW偏差的 平均值





图14 拉萨12时 (a) GZZ-2探空仪和 (b) GTS-1探空仪的平均PW偏差随气温的变化。每隔2℃求一次PW偏差的平均值 Fig.14 Averaged PW differences by radiosonde humidity sensors (a) GZZ-2 and (b) GTS-1 at 1200 UTC as a function of *T* (surface air temperature) in each 2℃ *T* bin at Lhasa



图15 1999~2010年12时与00时的月平均地面气温之差

Fig.15 Monthly mean air temperature differences between 1200 UTC and 0000 UTC during the period from 1999 to 2010 at Lhasa and Naqu

位: ℃)。系数*a*<sub>i</sub> (*i*=0, 1, 2, 3) 见表3。在拉萨 *f*(*T*) 的计算公式如下,

$$f(T) = \begin{cases} 0.01775T - 0.3802 & (\text{GZZ-2}) \\ 0.3227 \exp\left[-\left(\frac{T - 14.45}{9.089}\right)^2\right] - 0.26 & (\text{GTS-1}) \end{cases}$$
(8)

在那曲f(T)的计算公式如下,

 $f(T) = -0.005415 \exp(0.304T)$  (GZZ-2). (9)

采用式 (6) ~ (9),分别对拉萨和那曲站探空 PW偏差进行订正。从图16可见,拉萨站PW偏差订 正后趋势线与对角线重合得很好,说明PW系统偏差 明显减少。那曲站PW偏差订正后,PW系统偏差也 明显减少(图17)。从表4可见,在12时的PW偏差订 正后系统误差明显减小。拉萨站的PW偏差订正后, GZZ-2的多年平均PW偏差从原来-15.8%减弱为 0.02%,GTS-1的多年平均PW偏差从原来-7.3%减 弱为0.03%。GZZ-2的PW偏差标准差从原来 1.28 mm减少为1.21 mm。F检验表明两种探空仪PW 偏差的标准差在订正前后的差别是显著的,都通过 了信度α=0.01显著性检验。这说明PW偏差订正 后,拉萨站的PW随机误差也有所改善。那曲站PW 偏差订正后,GZZ-2的平均PW偏差从原来-12.4% 减弱为-0.4%,GZZ-2的PW偏差标准差从原来 0.95 mm减少为0.80 mm。F检验表明那曲站GZZ-2 的PW偏差的标准差在订正前后的差别也是显著的, 都通过了信度α=0.01显著性检验。这说明那曲站 PW偏差订正后PW的随机误差也有所改善。综上所 述,对拉萨和那曲站的PW偏差订正后,PW系统偏 差明显减小,随机误差也有一定改善。

807

#### 表3 订正方程系数

Table 3 The polynomial coefficients of the calibrationformulas for R errors

站点	探空仪	$a_0$	$a_1$	$a_2$	$a_3$
拉萨	GZZ-2	270.076	-9.9724	0.120614	-0.0004807
拉萨	GTS-1	-90.677	3.1333	-0.036527	0.0001429
那曲	GZZ-2	-344.646	13.2205	-0.169417	0.0007232



图16 拉萨12时 (a、b) GZZ-2和 (c、d) GTS-1探空仪的PW偏差订正: (a、c) 原始观测; (b、d) 订正结果。实线: 趋势线; 虚线: 对角线 Fig. 16 Corrections to PW differences by radiosonde humidity sensors (a, b) GZZ-2 and (c, d) GTS-1 at 1200 UTC at Lhasa: (a, c) Without corrections; (b, d) with corrections. Solid lines represent linear trend, dotted lines are diagonal lines



图17 那曲12时GZZ-2探空仪的PW偏差订正: (a) 原始观测; (b) 订正结果。实线为趋势线

Fig.17 Correction to PW differences by radiosonde humidity sensor GZZ-2 at 1200 UTC at Naqu: (a) Without correction; (b) with correction. Solid lines represent linear trend, dotted lines are diagonal lines

表4 不同探空仪1200 UTC的PW偏差订正前后比较 Table 4 Comparison of mean PW biases by different radiosonde

humidity sensors between with and without corrections at 1200 UTC						
站点	年份	探空仪	类型	绝对偏差/mm	相对偏差	标准差/mm
拉萨	1999~2004	GZZ-2	不订正	-1.57	-15.8%	1.67
			订正	0.002	0.02%	1.56
	2005~2010	GTS-1	不订正	-0.68	-7.3%	1.28
			订正	0.003	0.03%	1.21
那曲	2003	GZZ-2	不订正	-0.85	-12.4%	0.95
			订正	-0.03	-0.4%	0.80

# 4 结论与讨论

(1) 基于近十多年(1999~2010) 青藏高原地基 GPS遥感的大气水汽总量(G)和探空大气水汽观测 (R) 的对比分析,指出了PW偏差(R-G)的变化趋 势特征,PW偏差呈逐年减少趋势,这与探空仪的更 新有关。另外,PW偏差的年际变化还可能与同型号 探空仪的生产工艺不断改善有关,有待进一步研究。

(2) 以G为对比参照标准,证明了近10多年青藏 高原R明显偏小,偏小程度随不同探空仪而异。探 空仪的更新换代对减少高原PW偏差具有明显作用, 证实了我国新一代电子探空仪(GTS-1)比机械探 空仪(GZZ-2)具有更高的探测精度。同时也佐证 了高原G资料的准确性。

(3) 高原PW偏差具有季节变化和日变化特征, 夏季比冬季更明显,12时比00时更明显。另外,PW 偏差随太阳总辐射增强或气温增高而越明显。说明 太阳辐射加热与气温的日变化和季节变化是造成高 原PW偏差日变化和季节变化的重要原因。

(4) 构建了PW偏差的订正模式,该模式以太阳

天顶角和地面气温作为输入变量。以拉萨和那曲站 为例,分别给出了实用订正方程,取得了较好的订 正效果。

随着高原广泛布设地基GPS站以及G资料的积累,充分利用G资料检验高原探空仪探测大气湿度的精度,对于进一步了解国产探空仪的不足以及高原R资料的订正都有重要意义。另外,由于造成探空水汽误差的原因复杂,本研究提出的PW偏差订正模式需要更多站点的资料做进一步验证。

**致谢** 感谢审稿专家提出的宝贵意见和建议;感谢麻省理工学院 Bob King 教授对 GAMIT 软件应用问题的详细解答。

## 参考文献 (References)

- Bevis M, Businger B, Chiswell S, et al. 1994. GPS meteorology: Mapping zenith wet delays onto precipitable water [J]. J. Appl. Meteor., 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 [M]. J. Geophys. Res., 97 (D14): 15787–15801.
- 毕研盟, 毛节泰, 刘晓阳, 等. 2006. 应用地基 GPS 遥感倾斜路径方向大 气水汽总量. 地球物理学报 [J]. 49 (2): 335–342. Bi Yanmeng, Mao Jietai, Liu Xiaoyang, et al. 2006. Remote sensing of the amount of water vapor along the slant path using the ground-base GPS [J]. Chinese Journal of Geophysics (in Chinese), 49 (2): 335–342.
- 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: L09705, doi: 10.1029/ 2006GL028039.
- Bolton D. 1980. The computation of equivalent potential temperature [J]. Mon. Wea. Rev., 108 (7): 1046–1053.
- Byun S H, Bar-Sever Y E. 2009. A new type of troposphere zenith path delay product of the international GNSS service [J]. J. Geod., 83 (3-4): 1–7.

Cady-Pereira K E, Shephar M W, Turne D D, et al. 2008. Improved daytime column-integrated precipitable water vapor from vaisala radiosonde humidity sensors [J]. J. Atmos. Oceanic Technol., 25 (6): 873–883.

Durre I, Vose R S, Wuertz D B. 2006. Overview of the integrated global radiosonde archive [J]. J. Climate, 19(1): 53–68.

- Elgered G. 1993. Tropospheric radio path delay from ground-based microwave radiometry [M]// Jandden M A. Atmospheric Remote Sensing by Microwave Radiometry. New York: John Wiley, 215-258.
- Elgered G, Divis J L, Herring T A, et al. 1991. Geodesy by radio interferometry: Water vapor radiometry for estimation of the wet delay [J]. J. Geophys. Res., 96 (B4): 6541-6555.
- Guerova G, Brockmann E, Schubiger F, et al. 2005. An integrated assessment of measured and modeled integrated water vapor in Switzerland for the period 2001-03 [J]. J. Appl. Meteor., 44 (7): 1033–1044.
- Herring T A, King R W, McClusky S C. 2006. GAMIT reference manual [R]. Department of earth, atmospheric, and planetary sciences, Massachussetts Institute of Technology. 183pp.
- Hogg D C, Guiraud F O, Snider J B, et al. 1983. A steerable dual-channel microwave radiometer for measurement of water vapor and liquid in the troposphere [J]. J. Appl. Meteor., 22 (5): 789–806.
- Iwabuchi T, Shoji Y, Shimada S, et al. 2004. Tsukuba GPS dense net campaign observations: Comparison of the stacking maps of post-fit phase residuals estimated from three software packages [J]. J. Meteor. Soc. Japan, 82 (1B): 315–342.
- 李成才, 毛节泰. 2004. 地基GPS遥感大气水汽总量中的"静力延迟"和 "湿延迟" [J]. 大气科学, 28 (5): 795-800. Li Chengcai, Mao Jietai. 2004. The concepts of hydrostatic delay and wet delay in remote sensing water vapor with ground based GPS receivers [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 28 (5): 795-800.
- 李成才, 毛节泰, 李建国, 等. 1999. 全球定位系统遥感水汽总量[J]. 科 学通报, 44 (3): 333–336. Li Chengcai, Mao Jietai, Li Jianguo, et al. 1999. Remote sensing of atmospheric water vapor using the global positioning system[J]. Chinese Science Bulletin (in Chinese), 44 (3): 333–336.
- Li F. 2006. New development with upper air sounding in China [R]. Instruments and Observing Methods Report No. 94, WMO/TD No. 1354. Geneva: WMO.
- 李建国, 毛节泰, 李成才, 等. 1999. 使用全球定位系统遥感水汽分布原 理和中国东部地区加权"平均温度"的回归分析 [J]. 气象学报, 57 (3): 283–292. Li Jianguo, Mao Jietai, Li Chengcai, et al. 1999. The approach to remote sensing of water vapor based on GPS and linear regression *T<sub>m</sub>* in eastern region of China [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 57 (3): 283–292.
- 李生辰,李栋梁,赵平,等. 2009. 青藏高原"三江源地区"雨季水汽输 送特征 [J]. 气象学报, 67 (4): 591–598. Li Shengchen, Li Dongliang, Zhao Ping, et al. 2009. The climatic characteristics of vapor transportation in rainy season of the origin area of three rivers in Qinghai-Xizang Plateau [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 67 (4): 591–598.
- 李伟, 李锋, 赵志强, 等. 2009. 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, 95pp. Li Wei, Li Feng, Zhao Zhiqiang, et al. 2009. Technology Assessment Report for the Development of the L-Band

Upper Air Sounding System (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 95pp.

- 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 [J]. 自然资源学报, 21 (4): 526–534. Liang Hong, Liu Jingmiao, Li Shikui. 2006. Analysis of precipitable water vapor source distribution and its seasonal variation characteristics over Tibetan Plateau and its surroundings[J]. Journal of Natural Resources (in Chinese), 21 (4): 526–534.
- 梁宏, 张人禾, 刘晶森. 2012. 青藏高原大气水汽探测误差及其成因 [J]. 气象学报, 70 (1): 155-164. Liang Hong, Zhang Renhe, Liu Jingmiao. 2012. Systematic errors in the precipitable water vapor measurements and its causes on the Tibetan Plateau[J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 70 (1): 155-164.
- 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.
- 刘红燕, 王迎春, 王京丽, 等. 2009. 由地基微波辐射计测量得到的北京 地区水汽特性的初步分析[J]. 大气科学, 33 (2): 388–396. Liu Hongyan, Wang Yingchun, Wang Jingli, et al. 2009. Preliminary analysis of the characteristics of precipitable water vapor measured by the ground-based 12-channel microwave radiometer in Beijing [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 33 (2): 388–396.
- 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 (10): D17106, doi: 10.1029/ 2004JD005715.
- Liu J M, Liang H, Sun Z A, et al. 2006. Validation of the MODIS precipitable water vapor product using measurements from GPS on the Tibetan Plateau [J]. J. Geophys. Res., 111: D14103, doi: 10.1029/ 2005JD007028.
- Pacione R, Vespe F. 2008. Comparative studies for the assessment of the quality of near-real-time GPS-derived atmospheric parameters [J]. J. Atmos. Oceanic Technol., 25 (5): 701–714.
- Rocken C, van Hove T, Ware R H. 1997. Near real-time GPS sensing of atmospheric water vapor [J]. Geophys. Res. Lett., 24 (24): 3221–3224.
- Rocken C, Ware R H, van Hove T, et al. 1993. Sensing atmospheric water vapor with the global positioning system [J]. Geophys. Res. Lett., 20 (23): 2631–2634.
- Saastamoinen J. 1973. Contributions to the theory of atmospheric refraction[J]. Bulletin Géodésique, 107 (1): 13–34.
- Sapucci L F, Machado L A T, da Silveira R B, et al. 2005. Analysis of relative humidity sensors at the WMO radiosonde intercomparison experiment in Brazil [J]. J. Atmos. Oceanic Technol., 22 (6): 664–678.
- 施晓晖, 徐祥德, 程兴宏. 2009. 2008年雪灾过程高原上游关键区水汽输 送机制及其前兆性"强信号"特征 [J]. 气象学报, 67 (3): 478–487. Shi Xiaohui, Xu Xiangde, Cheng Xinghong. 2009. Premonitory of water vapor transport in the upstream key region over the Tibetan Plateau during the 2008 snowstorm disaster in South China [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 67 (3): 478–487.
- Takagi T, Kimura F, Kono S. 2000. Diurnal variation of GPS precipitable water at Lhasa in premonsoon and monsoon periods [J]. J. Meteor. Soc.

Japan, (78): 175-180.

- 陶大文. 1997. 我国探空仪发展历程的回顾与前景展望 [J]. 气象水文海 洋仪器, 2 (4): 42–46. Tao Dawen. 1997. Review and prospects for radiosonde development process in China [J]. Meteorological, Hydrological and Marine Instruments (in Chinese), 2 (4): 42–46.
- van Baelen J, 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.
- Vey S, Dietrich R, Rülke A, et al. 2010. Validation of precipitable water vapor within the NCEP/DOE reanalysis using global GPS observations from one decade [J]. J. Climate, 23 (7): 1675–1695.
- 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 J H, Zhang L Y, Dai A G, et al. 2007. A near-global, 2-hourly data set of atmospheric precipitable water from ground-based GPS measurements [J]. J. Geophys. Res., 112: D11107, doi: 10.1029/ 2006JD007529.
- Webb F H, Zumberge J F. 1997. An introduction to GIPSY/OASIS-II [R]. JPL publication D-11088.
- 魏凤英. 2007. 现代气候统计诊断与预测技术 [M]. 北京: 气象出版社, 296pp. Wei Fengying. 2007. Modern Climatic Statistic Diagnosis and Forecast Technology (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 296pp.
- WMO. 2008. Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation [R]. Seventh edition, WMO-No. 8, 249–294.
- 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 Yi, Zhang Zhiping, Cao

Yunchang, et al. 2009. Experiment and analysis of GPS radiosonde RS92 performance [J]. Meteorological Science and Technology (in Chinese), 37 (3): 336–340.

- Xu X D, Lu C G, Shi X H, et al. 2008. World water tower: An atmospheric perspective [J]. Geophys. Res. Lett., 35: L20815, doi: 10.1029/2008GL035867.
- 姚雯, 马颖, 徐文静. 2008. L波段电子探空仪相对湿度误差研究及其应 用 [J]. 应用气象学报, 19 (3): 356–361. Yao Wen, Ma Ying, Xu Wenjing. 2008. Relative humidity error of L-band electronic radiosonde and its application [J]. Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese), 19 (3): 356–361.
- Ye D Z, Wu G X. 1998. The role of the heat source of the Tibetan Plateau in the general circulation [J]. Meteor. Atmos. Phys., 67 (1–4): 181–198.
- 占瑞芬, 李建平. 2008. 青藏高原地区大气红外探测器 (AIRS) 资料质 量检验及揭示的上对流层水汽特征[J]. 大气科学, 32 (2), 242–260. Zhan Ruifeng, Li Jianping. 2008. Validation and characteristics of upper tropospheric water vapor over the Tibetan Plateau from AIRS satellite retrieval [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 32 (2): 242–260.
- 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,
  58pp. China Meteorological Administration. 2010. Operational Standards for Conventional Upper Air Meteorological Observation (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 58pp.
- 中国气象局监测网络司. 2005. 气象仪器和观测方法指南(第六版) [R]. 489pp. Department of Monitoring Network. 2005. Guide to meteorological instruments and methods of observation (in Chinese) [R]. Sixth edition, Department of Monitoring Network, China Meteorological Administration, 489pp.