

青藏高原大气水汽探测误差及其成因^{*1}

梁宏^{1,2} 张人禾¹ 刘晶淼^{1,3}

LIANG Hong^{1,2} ZHANG Renhe¹ LIU Jingmiao^{1,3}

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

1. *Chinese Academy of Meteorological Science, Beijing 100081, China*

2. *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*

3. *Institute of Atmospheric Environment, China Meteorological Administration, Shengyang 110016, China*

2010-01-15 收稿,2010-03-26 改回.

Liang Hong, Zhang Renhe, Liu Jingmiao. 2012. Systematic errors in the precipitable water vapor measurements over the Tibetan Plateau and its causes. *Acta Meteorologica Sinica*, 70(1):155-164

Abstract The distribution of the precipitable water vapor (PW) over the Tibetan Plateau has an important impact on the regional weather and climate. The reliability of PW measurements is of concern. The characteristics of the systematic and random errors of the radiosonde (RS) PW data in comparison with ground-based GPS measurements at Lhasa during the period from 1999 – 2008 and at Naqu in 2003 are studied. The results show that the RS_PW is significant dryer than the GPS_PW at Lhasa in recent 10 years. Different types of humidity sensor show a different magnitude of the dry bias of PW. The GZZ-2 (goldbeater's skin hygrometer) and the GTS-1 (carbon hygristor) have the relative mean dry bias of 8.8% and 4.4%, respectively, and have the relative mean random errors of 19.8% and 13.3%, respectively. The relative PW difference is apparently reduced in recent 10 years, from 12.7% to 2.4%. The main reason is that high performance humidity sensors (GTS-1) have been introduced. The variation characteristics of the RS_PW dry bias are also investigated. The results show that the RS_PW dry bias exhibited pronounced diurnal and annual variations. The dry bias of the RS_PW is much larger at 12:00 UTC than that at 00:00 UTC and larger in summer than that in winter. The GZZ-2 and the GTS-1 have the relative mean PW bias of 15.8% and 8.3%, respectively, at 12:00 UTC at Lhasa. The GZZ-2 and the GTS-1 have the relative mean PW bias of 1.6% and 0.5%, respectively, at 00:00 UTC at Lhasa. The GZZ-2 has the relative mean PW bias of 12.4% and 0.3% at 12:00 and 00:00 UTC respectively. The causes of diurnal and annual variation of the RS_PW dry bias are analysed. It can be seen that the diurnal variations of the RS_PW dry bias are significant mainly because the air temperature is higher at 12:00 UTC than that at 00:00 UTC. The annual variations of the RS_PW dry bias are pronounced mainly because the air temperature is higher in summer than that in winter.

Key words Precipitable water vapor (PW), Radiosonde, Ground-based GPS, Systematic error, Tibetan Plateau

摘要 青藏高原大气水汽分布对区域天气气候有很大影响,其探测资料的可靠性备受关注。以地基全球定位系统(GPS)遥感的大气可降水量为对比参照,分析了1999—2008年拉萨和2003年那曲探空观测大气降水量的误差及其原因。结果表明,近10年拉萨站探空观测的可降水量比GPS遥感的可降水量明显偏小,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大气可降水量相对偏差分别为8.8%和4.4%,随机误差分别为19.8%和

* 资助课题:国家自然科学基金项目(40775020、40905038)、中国气象局新技术推广项目(CMATG2007Z05)、国家自然科学基金重点项目(40533015)。

作者简介:梁宏,主要从事大气水循环研究。E-mail:liangh@cma.gov.cn

13.3%。近 10 年大气可降水量探测偏差具有减少的趋势,从 12.7%减少至 2.4%,主要是由探空仪性能改进所致。分析发现青藏高原大气可降水量探测偏差具有明显的日变化,12 时(世界时)比 00 时大。拉萨站 GZZ-2 型和 GTS-1 型探空仪在 12 时多年平均的大气可降水量探测偏差分别为 15.8%和 8.3%,00 时分别为 1.6%和 0.5%。那曲站 GZZ-2 型探空仪在 12 和 00 时的大气可降水量探测偏差分别为 12.4%和 0.3%。大气可降水量探测偏差还具有季节变化,夏季大,冬季小。对大气可降水量探测偏差日变化和季节变化的成因分析表明,12 时气温比 00 时气温高以及夏季比冬季气温高是造成大气可降水量探测偏差日变化和季节变化的重要原因。

关键词 大气可降水量(PW), 探空仪, 地基全球定位系统, 系统性误差, 青藏高原
中图法分类号 P412

1 引言

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(孙建华等,2001)。高原大尺度地形对气流起到阻挡、分流和引导作用,其东南侧将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(施晓辉等,2009;张雪梅等,2009;李生辰等,2009),其探测资料的可靠性备受关注(梁宏等,2006;Liu, et al, 2006)。据有关研究(Takagi, et al, 2000; Liu, et al, 2005),高原无线电探空(RS)探测的大气可降水量(PW)存在明显“干偏差”。目前大气可降水量探空观测主要存在 3 种类型的误差(Wang, et al, 2008),即仪器系统误差、时空分布非均匀性误差和日采样频率低造成的误差。系统误差主要由探头性能不良所造成,如探头被污染、未校正、感应时间滞后或由其他物理因素。20 世纪末至 21 世纪初,在高原上应用最多的探空仪是 59 型机械电码式探空仪,其探测性能与发达国家同时代通用探空仪有较大差距。中国从 2002 年 1 月开始推广使用国产 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,达到了发达国家 20 世纪 90 年代的测量水平(Li, 2006),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)。鉴于高原大气水汽变化及其分布对区域天气气候的重要性,有必要对高原探空观测的大气可降水量(RS_PW)的误差进行探讨。本文基于高原拉萨和那曲站的相关资料,与地基全球定位系统(GPS)遥感的大气可降水量(GPS_PW)进行对比,初步分析近 10 年(1999—2008 年)高原 RS_PW 误差的变化特征及其原因。

以 GPS_PW 为参照的主要原因是其具有高时间分辨率(几分钟)、高精度、全天候、自校准和长期稳定等优点(Wang, et al, 2007),GPS_PW 的精度接近于微波辐射计探测的精度,明显优于探空观测(RS_PW)的精度(Liou, et al, 2001; Liuz, et al, 2005; Guerova, et al, 2005; 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大气降水量的原理和方法请参考 Hogg 等(1983)、Liou 等(2001)、刘红燕等(2009)文献。

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°E)位于高原中部,属于高原亚干旱区。拉萨探空站(海拔 3650 m)位于西藏自治区气象局院内,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,海拔 3650 m)安装在西藏自治区测绘局楼顶,是国际全球导航卫星系统服务(IGS)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为 3 km。那曲地基 GPS 站和探空站均位于那曲气象局气象观测站内(海拔 4477 m),该站是在 2000 年 9 月开始实施的“中-日合作青藏水循环长期合作观测计划”项目资助下所建。Wang 等(2008)指出,当地基 GPS 站与探空站的水平距离在 50 km 之内、海拔高度差小于 100 m 时,可对两站探测的大气可降水量进行比较。表 1 给出了拉萨和那曲探空站及 GPS 站的设备信息。2002 年 5 月—2007 年 2 月,拉萨 GPS 站有 2 台双频地基 GPS 接收机并行开展观测。2004 年 12 月之前拉萨探空站采用 GZZ-2 探空仪,属 59 型探空仪系列,从 2005 年 1 月开始采用 GTS-1 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,由于资料传输和存储

表1 拉萨和那曲地基 GPS 与探空站的设备信息

Table 1 The equipment information of the ground-based GPS and radiosondes at Lasa and Naqu

站名	GPS 站		探空站	
	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. 2—2007. 2	GZZ-2(59 型机械电码式探空仪) 湿敏感元件:肠衣	1967. 1—2004. 12
	TPS E-GGD 双频 IGS 编号:NO. 21613M002 站名:lhaz	2002. 5—	GTS-1(数字式电子探空仪) 湿敏感元件:碳湿敏电阻	2005. 1—
那曲	ASHTECH Z-12 双频	2000. 9—2004. 4	GZZ-2	1970. 5—2005. 9

不当造成资料丢失等客观原因,本文仅用了那曲 2003 年的 GPS 资料。2003 年那曲探空站采用 GZZ-2 探空仪进行观测。

2.2 GPS_PW 资料

全球定位系统(GPS)是由 30 颗卫星组成的卫星系统(Wang, et al, 2008),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大气可降水量(Bevis, et al, 1992, 1994; Rocken, et al, 1993, 1997)。拉萨 GPS 站的天顶对流层总延迟(ZTD)可从国际全球导航卫星系统服务(IGS)网站(FTP://cddis.gsfc.nasa.gov/gps/products/trop)下载,所用处理软件为 GIPSY-OASIS II(Webb, et al, 1997)。这些 ZTD 数据误差小于 4 mm,即对应的大气可降水量反演误差小于 0.6 mm(Bevis, et al, 1994)。本文采用 1999—2008 年的 ZTD 资料。1998—2000 年资料时间分辨率为 2 h,2001—2008 年资料时间分辨率为 5 min。将资料线性插值为时间分辨率 30 min 的 ZTD 时间序列。对于那曲站 2003 年的 GPS 资料,采用 GAMIT 软件(V10.31)(Herring, et al, 2006)处理,反演出那曲站每 30 min 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, et al, 2008)。根据 ZTD 和本站气压即可反演天顶方向由水汽造成的 GPS 信号延迟(ZWD),即对流层天顶湿延迟(Saastamoinen, 1973; Bevis, et al, 1994)。再根据 ZWD 和地面气温反演出间隔 30 min 的 GPS_PW(李建国等,1999)。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 °C,气压和气温给 GPS_PW 反演带来的误差可以忽略不计(Liu, et al, 2005)。GPS_PW 资料可用于气候研究、卫星遥感或其他地面观测结果标定等(Wang, et al, 2008)。因此,GPS_PW 可作为观测站点大气可降水量的基准值,从而用于分析 RS_PW 的误差。

2.3 探空及其他气象资料

每天 2 次(00 和 12 时,世界时,下同)的探空资料及逐时气温、气压资料从中国气象局国家气象信息中心获取,且均已经过了质量控制。将气温和气压线性插值为间隔 30 min 的时间序列,用于计算 GPS_PW。为了准确计算高海拔探空观测的大气可降水量,本文采用 Zhai 等(1997)的方法计算 RS_PW。由于高原的海拔高度几乎到了对流层中部,本文计算 RS_PW 所用的探空廓线资料最低要观测至 200 hPa,且至少要有 5 个标准层。

3 结果分析

3.1 大气可降水量探测偏差的变化特征

从 1999—2008 年拉萨月平均大气可降水量偏差(指 00 或 12 时相同时刻 GPS_PW 减去 RS_PW 之差)的变化可以看出(图 1),近 10 年大气可降水量探测偏差基本为正值,即 RS_PW 比 GPS_PW 偏小,说明拉萨探空相对湿度廓线偏小不是某个月或某个季度的特有现象,是长期系统偏差(图 1a)。而且,近 10 年大气可降水量总探测偏差具有明显减小的趋势,从 1999 年 1.28 mm(12.7%)减小至 2008 年 0.23 mm(2.4%)。大气可降水量探测日平均偏差还有年变化特征,夏季大,冬季小。而近 10 年 00

时的大气可降水探测偏差正、负值出现的频率大致相当(图 1b),并明显小于日平均偏差和 12 时的偏差(图 1c)。00 时的干偏差相对较小,大气可降水量探测偏差也有较弱的减小趋势,从 1999 年 0.74 mm(7.3%)减小至 2008 年 -0.1 mm(-1.0%)。近 10 年 12 时的大气可降水量探测偏差也基本为正

值,RS_PW 比 GPS_PW 明显偏小(图 1c),近 10 年偏差也具有明显减小趋势,从 1999 年 1.93 mm(19.1%)减小至 2008 年 0.53 mm(5.6%)。12 时的大气可降水量探测偏差也有明显的年变化特征,夏季大,冬季小。

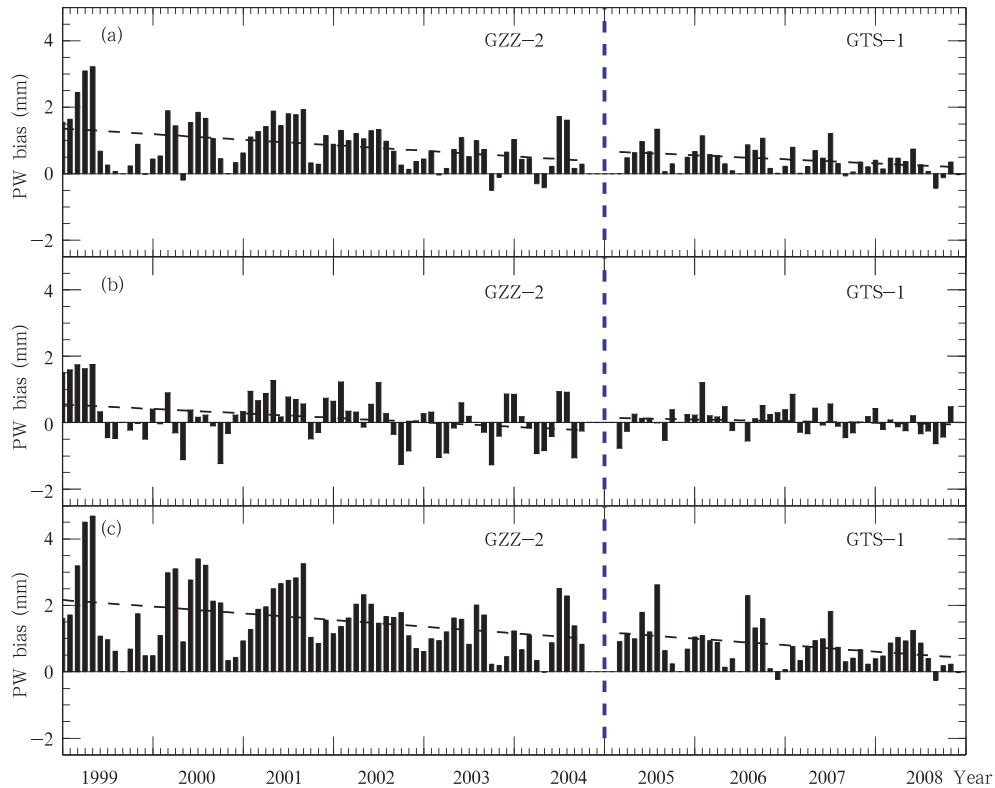


图 1 1999—2008 年拉萨月平均大气可降水量偏差及变化趋势

(a. 00 和 12 时日平均偏差, b. 00 时偏差, c. 12 时偏差)

Fig. 1 Time series and trend of the monthly mean PW bias at Lhasa during 1999–2008

(a. total PW bias at 00:00 and 12:00 UTC, b. PW bias at 00:00 UTC, c. PW bias at 12:00 UTC)

从 2003 年那曲月平均大气可降水量探测偏差的变化(图 2)可知,GZZ-2 的大气可降水量探测日平均偏差(图 2a)和 12 时的偏差(图 2c)也基本为正值,并具有明显的年变化特征,夏季大,冬季小。00 时的大气可降水量偏差较小,年变化特征不明显(图 2b)。以上分析表明,拉萨和那曲的探空湿度观测都偏小,大气可降水量探测偏差年变化特征明显。

大气可降水量探测偏差的长期均值能很好地代表 RS_PW 的系统干偏差。从大气可降水量探测偏差的统计(表 2)可知,拉萨站 GZZ-2 型机械探空仪的日平均、00 和 12 时的系统干偏差分别为 0.87 mm(8.8%)、0.16 mm(1.6%)和 1.57 mm

(15.8%);GTS-1 型电子探空仪的日平均、00 和 12 时的系统干偏差分别为 0.41 mm(4.4%)、0.05 mm(0.5%)和 0.77 mm(8.3%)。显然 RS_PW 的系统干偏差与探空仪的类型密切相关,GTS-1 型比 GZZ-2 型机械探空仪的精度提高了一倍。 t 检验(魏凤英,2007)结果表明,在 $\alpha = 0.05$ 的显著性水平上,两种探空仪的日平均和 12 时的系统干偏差均显著,而 00 时的系统干偏差则不显著。那曲站 GZZ-2 的日平均、00 和 12 时的系统干偏差分别为 0.45 mm(6.6%)、0.02 mm(0.3%)和 0.85 mm(12.4%)。在 $\alpha = 0.05$ 的显著性水平上,那曲 GZZ-2 的日平均和 12 时的系统干偏差显著,而 00

时的系统干偏差不显著。以上分析表明,高原 RS_PW 的偏差主要出现在 12 时。大气可降水量探测偏差的标准差能很好的代表探空的随机误差 (Wang, et al, 2008)。拉萨 GZZ-2 和 GTS-1 型探空仪的大气可降水量探测随机误差分别为 1.74 mm (19.8%) 和 1.17 mm (13.3%), 那曲 GZZ-2 型探空仪的大气可降水量探测随机误差为 0.99 mm

(14.5%), 说明 GTS-1 比 GZZ-2 型探空仪更稳定。表 2 中那曲 GZZ-2 的大气可降水量探测偏差和其偏差标准差比拉萨的略小, 这是因所用资料长度和两站大气可降水量等不同所致, 仔细比较 2003 年两站大气可降水量探测偏差的变化及量级 (图 1c、图 2c) 可知, 两站大气可降水量探测偏差基本一致, 说明在高原上 GZZ-2 的大气可降水量探测偏差具有

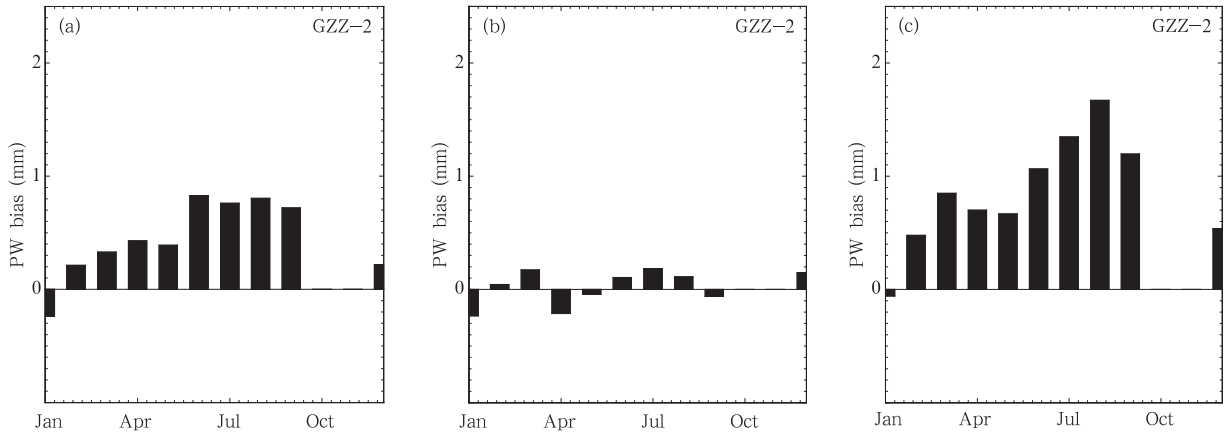


图 2 2003 年那曲月平均大气可降水量探测偏差 (a. 00 和 12 时平均偏差, b. 00 时偏差, c. 12 时偏差)

Fig. 2 Time series of the monthly mean PW bias at Naqu in 2003

(a. total PW bias at 00:00 and 12:00 UTC, b. PW bias at 00:00 UTC, c. PW bias at 12:00 UTC)

表 2 不同探空仪的大气可降水量探测偏差统计

Table 2 The statistical results of the PW bias by the different radiosondes at Lhasa and Naqu

站点	时段	探空仪	时间	绝对偏差 (mm)	相对偏差 (%)	偏差标准差 (mm)
拉萨	1999—2004	GZZ-2	日平均	0.87	8.8	1.74
			00 时	0.16	1.6	1.49
			12 时	1.57	15.8	1.67
	2005—2008	GTS-1	日平均	0.41	4.4	1.17
			00 时	0.05	0.5	0.97
			12 时	0.77	8.3	1.25
那曲	2003	GZZ-2	日平均	0.45	6.6	0.99
			00 时	0.02	0.3	0.81
			12 时	0.85	12.4	0.95

注: 相对偏差为大气可降水量偏差与 GPS_PW 的百分比。

一定的共性。

如拉萨站 GZZ-2 和 GTS-1 型探空仪的大气可降水量探测偏差频率分布 (图 3) 所示, GZZ-2 的大气可降水量探测偏差最大值在 00 和 12 时分别达 6 mm (60.6%) 和 8 mm (80.8%), GTS-1 探测的大气可降水量偏差最大值在 00 和 12 时分别达 4 mm (40.4%) 和 6 mm (60.6%)。GTS-1 比 GZZ-2 探测的大气可降水量偏差频率分布更集中, 进一步说明

了 GTS-1 比 GZZ-2 的探测精度高。两种探空仪的大气可降水量探测偏差无论在 00 或 12 时几乎都以均值为中心对称分布, 都是单峰型。12 时的大气可降水量探测偏差显然大于 00 时。t 检验结果表明, 两种探空仪的大气可降水量系统干偏差在 00 和 12 时均显著。那曲站的分析结果也表明, 在 00 和 12 时 GZZ-2 的大气可降水量系统干偏差显著 (图略), 且 12 时的大气可降水量探测偏差大于 00 时。

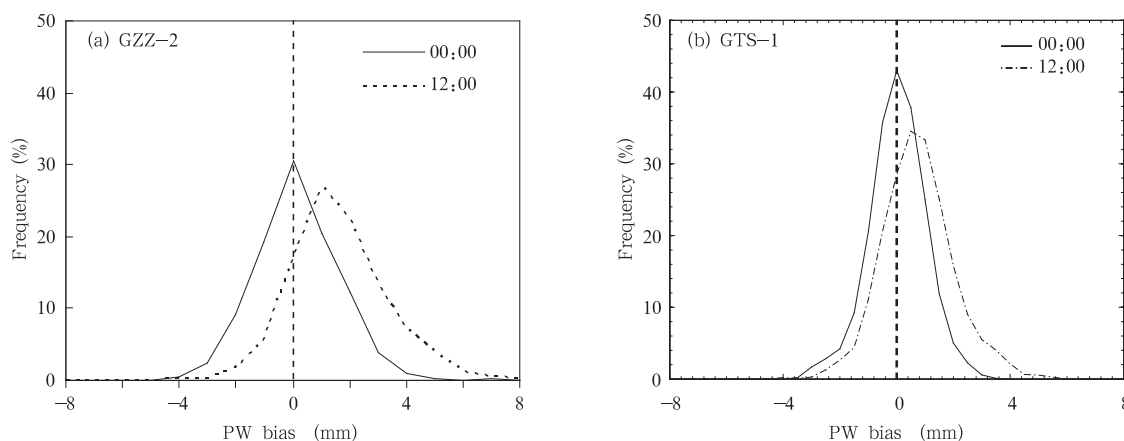


图3 拉萨不同探空仪大气可降水量偏差的频率分布
(a. GZZ-2, b. GTS-1)

Fig. 3 Frequency distribution of the PW bias by the different radiosondes (a) the GZZ-2 and (b) the GTS-1 at Lhasa

3.2 大气可降水量探测偏差的原因分析

3.2.1 大气可降水量探测偏差的因素分析

造成大气可降水量探测偏差的因素包括:不同的探测方式(与设备的测量精度无关)、对比测站间的距离、GPS 设备测量误差和探空仪器测量误差。GPS 探测的信号是从卫星透过所经路径的大气而传播到接收机的,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 反演大气可降水量时都用到至少 4 颗以上仰角高于 15° 的卫星,考虑 10 km 高的水汽层,其水平探测半径为 20—30 km 的量级。探空探测的是探空气球运动轨迹上的信号,由于水平飘移,探空气球从地面上升到 10 km 高度,会水平飘移 20 km 左右。水平飘移造成的大气可降水量误差是很难估计的,其与大气的不均匀程度有关。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,而由大气水汽水平分布不均匀造成的大气可降水量偏差却是随机的,在大样本量的条件下(如拉萨和那曲的数据样本量分别约为 5000 和 700)不会造成系统性偏差。

在资料获取上,GPS 提供的是整层的大气延迟,探空所能提供的只有标准层次。这种差别可能会造成 RS_PW 比 GPS_PW 系统偏低,但从大气可降水量偏差的年际变化情况来看,探测层次少只是次要原因。

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,不会因为距离造成系统性偏差。

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误差的影响,总延迟误差为 4 mm。2002 年 5 月—2007 年 2 月拉萨 AOA SNR-8000ACT 和 TPS E-GGD 接收机遥感总延迟的相关系数为 99.9%,月平均总延迟的偏差仅为 0.1%(图略),可见本文所用的总延迟资料具有较好的均一性和较高的精度。

探空仪器测量误差会造成大气降水量的偏差。近 10 年拉萨大气降水量的偏差逐年减少及探空仪更换使大气降水量的偏差明显缩小也说明了这一点。RS_PW 比 GPS_PW 系统偏小反映了探空仪探测的相对湿度偏小,而探测方式不同不会造成大气可降水量偏差逐年减少。探空可能因为湿度探测传感器灵敏度不高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)也是产生探空仪测量误差的因素。以上分析表明,探空仪测量误差是导致高原大气可降水量偏差的主要原因。

3.2.2 探空仪器测量误差的影响因子

近 10 年 GZZ-2 和 GTS-1 探测的大气可降水量均为 00 时偏差不显著,而 12 时偏差显著。对导致

12 时探空仪测量误差的因子进行分析是必要的。据有关研究 (Gueroval, et al, 2005; Baelen, et al, 2005; Liuz, et al, 2005; Cady-Pereira, et al, 2008), Vaisala RS80-A 和 RS80-H 等先进探空仪所探测大气可降水量的系统干偏差是白天比夜间大, 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。

12 时的大气可降水量探测偏差之所以夏季大, 冬季小, 很可能与大气湿度和温度等因子有关。从拉萨在 12 时的平均大气可降水量探测偏差随 GPS_PW 的变化曲线(图 4)可以看出, 两种探空仪在 12 时的大气可降水量探测偏差都随着 GPS_PW 增大而增大, 说明 GPS_PW 大小对大气可降水量探测偏差有重要影响。两种探空仪相比, GZZ-2 在 12 时的

偏差随大气可降水量的变化较大, 变化范围为 0—3.5 mm, 主要维持在 2 mm 左右。GTS-1 的偏差随大气可降水量的变化较平缓, 变化范围为 0—2 mm, 主要维持在 1 mm 左右。可见, GPS_PW 大小对 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。那曲站 GZZ-2 在 12 时的大气可降水量探测偏差也随着 GPS_PW 增大而增大, 变化范围为 0—2 mm(图 7a)。但从拉萨近 10 年 00 和 12 时月平均 GPS_PW 的变化(图 5)可以看出, 00 和 12 时的 GPS_PW 的大小基本一致。在那曲站也是如此(图略)。根据大气可降水量探测偏差与 GPS_PW 大小的关系, GPS_PW 大小不是造成大气可降水量探测偏差在 12 时比在 00 时大的因子。

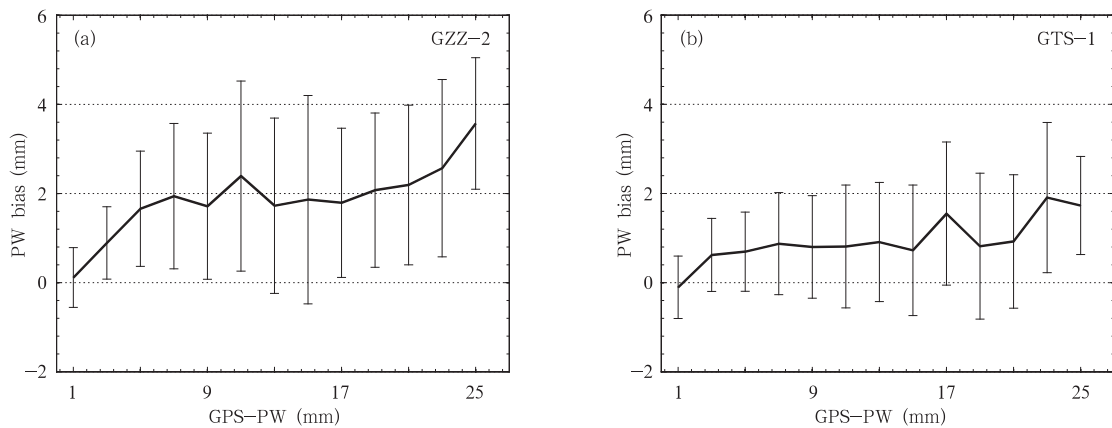


图 4 拉萨 12 时不同探空仪的平均大气可降水量探测偏差随 GPS_PW 的变化 (a. GZZ-2, b. GTS-1; 每 2 mm 求一次大气可降水量偏差的平均值)

Fig. 4 Averaged absolute PW bias as a function of the GPS_PW in each 2-mm PW bin for the different radisondes (a) the GZZ-2 and (b) the GTS-1 at 12:00 UTC at Lhasa

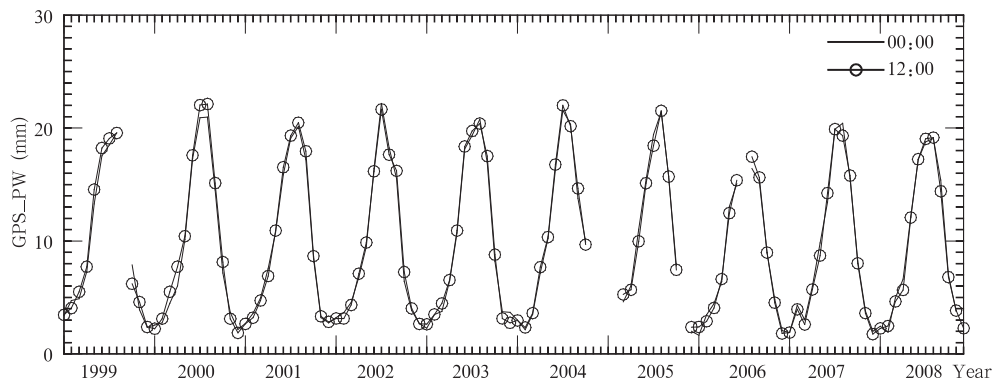


图 5 拉萨 00 和 12 时的月平均 GPS_PW 时间序列

Fig. 5 Time series of the monthly mean GPS_PW at 00:00 UTC and 12:00 UTC at Lhasa

从拉萨 12 时的大气可降水量探测偏差随地面气温的变化(图 6)可以看出,两种探空仪在 12 时的大气可降水量探测偏差都随着气温增大而增大,这说明气温越高对大气可降水量探测偏差的影响就越大。GZZ-2 的大气可降水量探测偏差随气温的变化较大,变化范围为 0—2.5 mm;而 GTS-1 探测的大气可降水量偏差随气温的变化较平缓,变化范围为

0—1.5 mm,在气温低于 17℃时,大气可降水量探测偏差维持在 1 mm 以内。可见气温对 GZZ-2 偏差的影响更大,也再一次说明 GTS-1 的探测精度比 GZZ-2 的高。那曲站 GZZ-2 在 12 时的大气可降水量探测偏差也随气温增大而增大,变化范围为 0—2.0 mm(图 7b)。

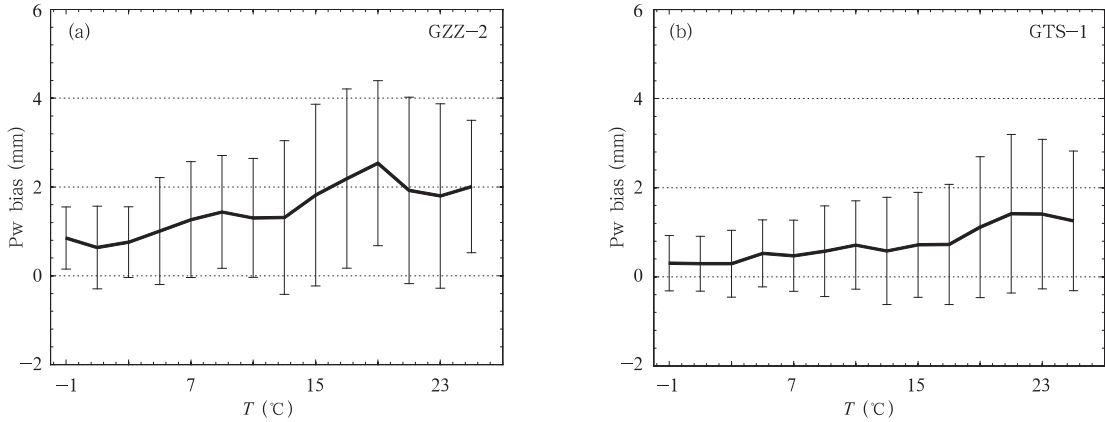


图 6 拉萨 12 时不同探空仪的平均大气可降水量探测偏差随气温的变化
(a. GZZ-2, b. GTS-1;每隔 2℃求一次偏差的平均值)

Fig. 6 Averaged absolute PW bias as a function of the surface air temperature in each 2℃ bin for the different radisondes (a) the GZZ-2 and (b) the GTS-1 at 12:00 UTC at Lhasa

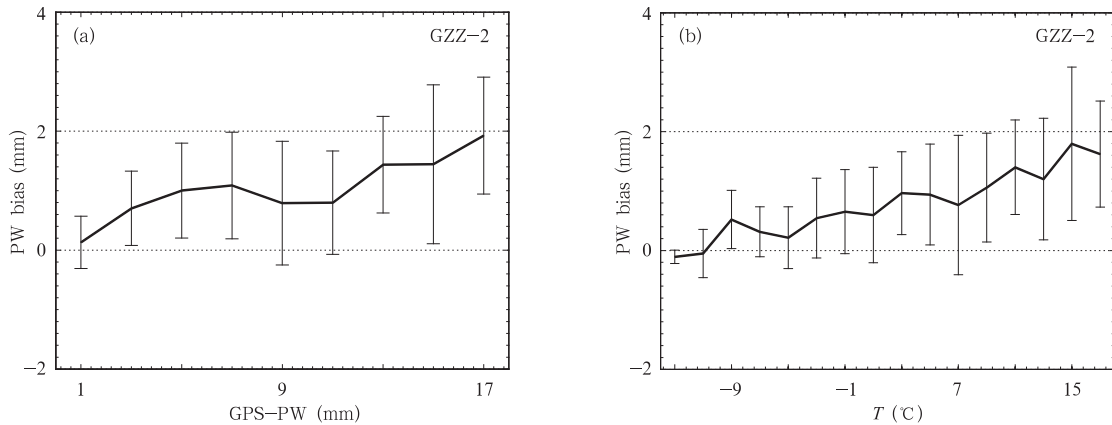


图 7 那曲 12 时平均大气可降水量探测偏差随(a)GPS_PW 和(b)气温的变化

Fig. 7 Averaged absolute PW bias as a function of the GPS_PW in each 2 mm PW bin (a) and T (surface air temperature) in each 2℃ T bin (b) at 12:00 UTC for the GZZ-2 at Naqu

相关研究(Guerova, et al, 2005;Baelen, et al, 2005;Liuz, et al, 2005;Cady-Pereira, et al, 2008)指出,对探空仪的湿度探头加热会造成相对湿度的测量结果偏小。对湿度探头加热的热量既可来自太阳辐射,也可来自大气热传导。图 8 给出了拉萨和

那曲 12 与 00 时地面气温的比较结果。可以看出,拉萨和那曲站 12 时的月平均地面气温比 00 时的气温分别高出 6—12℃和 6—14℃。根据地面气温(T)与大气平均温度(T_m)的经验线性关系式(李建国等,1999) $T_m = 44.05 + 0.81T$,即地面气温越高大

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 时的大气可降水量探测偏差和地面气温做相关分析(图略)结果表明,GZZ-2 的相关系数在拉萨和那曲分别为 0.434 和 0.468,GTS-1 的相关系数在拉萨为 0.383,都通过信度 $\alpha = 0.05$ 显著性检验。气温越高,探空湿度探

头的温度也就越高,因而大气可降水量探测偏差也就越大。综上所述,12 时气温比 00 时高是大气可降水量探测偏差在 12 时比在 00 时大的重要原因。同样,夏季气温比冬季高,应该是造成夏季大气可降水量探测偏差大的重要原因。

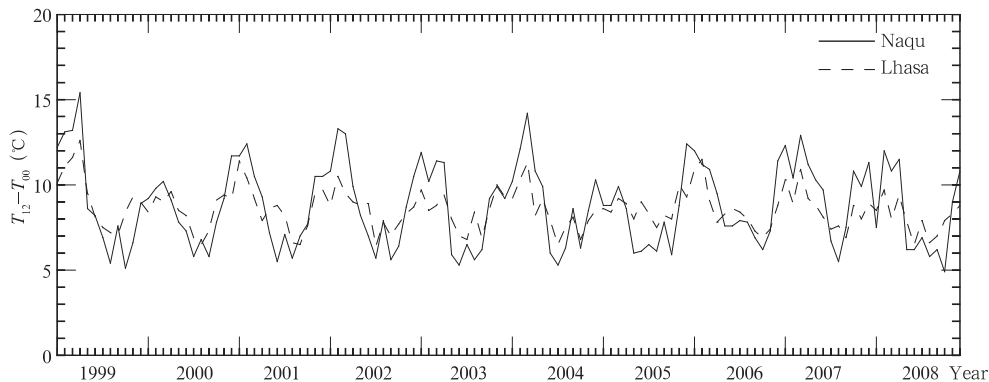


图 8 拉萨和那曲 12 与 00 时的月平均地面气温之差

Fig. 8 Differences of the monthly mean air temperature between that at 12:00 UTC and that at 00:00 UTC at Lhasa and Naqu

4 结论与讨论

(1) 1999—2008 年高原 RS_PW 比 GPS_PW 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大气可降水量探测偏差(GPS_PW 减去 RS_PW)分别为 0.87 mm(8.8%)和 0.41 mm(4.4%),随机误差分别为 1.74 mm(19.8%)和 1.17 mm(13.3%)。探空仪测量误差是导致高原 RS_PW 偏小的主要原因。

(2) 近 10 年高原大气可降水量探测偏差具有减小的趋势,从 1999 年的 1.28 mm(12.7%)减少至 2008 年的 0.23 mm(2.4%)。采用性能更先进的电子探空仪是高原大气可降水量探测偏差减少的重要原因。

(3) 高原大气可降水量探测偏差在 12 时大,00 时小。拉萨站在 12 时 GZZ-2 型和 GTS-1 型探空仪多年平均的大气可降水量探测偏差分别为 1.57 mm(15.8%)和 0.77 mm(8.3%),00 时分别为 0.16 mm(1.6%)和 0.05 mm(0.5%)。那曲站 GZZ-2 型探空仪在 12 和 00 时的大气可降水量探测偏差分别为 0.85 mm(12.4%)和 0.02 mm(0.3%)。

t 检验结果表明 GZZ-2 和 GTS-1 型探空仪探测的大气可降水量偏差都是在 12 时显著,而在 00 时不显著。

(4) 高原大气可降水量探测偏差随气温增高而增大。气温在 12 时比在 00 时高是大气可降水量探测偏差在 12 时比在 00 时大的重要原因。

(5) 高原大气可降水量探测偏差具有明显的季节变化特征,夏季大,冬季小,其与夏季气温更高有关。

随着高原广泛布设地基 GPS 站以及 GPS_PW 资料的积累,充分利用 GPS_PW 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对高原 RS_PW 资料的订正都有重要意义。

致 谢:感谢澳大利亚气象局孙治安博士和中国气象科学研究院姚雯副研究员提供的帮助。

参考文献

- 毕研盟,毛节奏,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, 49(2): 335-342
- 李建国,毛节奏,李成才. 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. 气象学报, 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. 气象学报, 67(4): 591-598
- 梁宏, 刘晶森, 李世奎. 2006. 青藏高原大气水汽分布及其变化特征. 自然资源学报, 21(4): 526-534
- 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. 大气科学, 33(2): 394-396
- 施晓辉, 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. 气象学报, 67(3): 478-487
- 孙建华, 陈红, 赵思雄等. 2001. 青藏高原人工水汽通道对西北地区夏季降水及环境影响 II: 对月降水量的模拟试验. 气候变化与环境研究, 6(4): 380-390
- 魏凤英. 2007. 现代气候统计诊断与预测技术. 北京: 气象出版社, 296pp
- 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
- 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. 应用气象学报, 19(3): 356-361
- 张雪梅, 江志红, 刘晓东等. 2009. 东亚地区水汽输送强、弱年水汽输送的异同. 气象学报, 67(4): 561-568
- Baelen J V, Aubagnac J P, Dabas A. 2005. Comparison of near-real time estimates of integrated water vapor derived with GPS, radiosondes, and microwave Radiometer. J Atmos Ocean Technol, 22(2): 201-210
- Bevis M, Businger S, Herring T A, et al. 1992. GPS meteorology: Remote sensing of atmospheric water vapor using the Global Positioning System. J Geophys Res, 97: 15787-15801
- Bevis M, Businger B, Chiswell S, et al. 1994. GPS meteorology: Mapping zenith wet delays onto precipitable water. J Appl Meteor, 33: 379-386
- 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 Atmos Ocean Technol, 25(6): 873-883
- 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 Appl Meteor, 44(7): 1033-1044
- Herring T A, King R W, McClusky S C. 2006. GAMIT Reference Manual. Department of Earth, Atmospheric, and Planetary Sciences, Massachusetts Institute of Technology
- 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 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 Meteor Soc Japan, 82(1): 315-342
- Li F. 2006. New developments with upper-air sounding in China. Instruments and Observing Methods Report No. 94, WMO/TD No. 1354. Geneva: WMO
- Liu Y A, Teng Y T, Hove T V, et al. 2001. Comparison of precipitable water observations in the near tropics by GPS, microwave radiometer, and radiosondes. J Appl Meteor, 40: 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 Geophys Res, 110(10): D17106, doi: 10.1029/2004JD005715
- Liu J, Liang H, Sun Z, et al. 2006. Validation of the MODIS precipitable water vapor product using measurements from GPS on the Tibetan Plateau. J Geophys Res, 111, D14103, doi: 10.1029/2005JD007028
- Luiz F S, Luiz A T, Machado, et al. 2005. Analysis of relative humidity sensors at the WMO radiosonde intercomparison experiment in Brazil. J Atmos Ocean Technol, 22(6): 664-678
- Pacione R, Vespe F. 2008. Comparative studies for the assessment of the quality of near-real-time GPS-derived atmospheric parameters. J Atmos Ocean Technol, 25: 701-713
- Rocken C, Ware R H, Hove T V, et al. 1993. Sensing atmospheric water vapor with the global positioning system. Geophys Res Lett, 20: 2631-2634
- Rocken C, Hove T V, Ware R H. 1997. Near real-time GPS sensing of atmospheric water vapor. Geophys Res Lett, 24: 3221-3224
- Saastamoinen J. 1973. Contributions to the theory of atmospheric refraction. Bull Geod, 107: 13-34
- Takagi T, Kimura F, Kono S. 2000. Diurnal variation of GPS precipitable water at Lhasa in premonsoon and monsoon periods. J Meteor Soc Japan, 78: 175-180
- Wang J, Zhang L, Dai A, et al. 2007. A near-global, 8-year, 2-hourly data set of atmospheric precipitable water from ground-based GPS measurements. J Geophys Res, 112: D11107, doi: 10.1029/2006JD007529
- Wang J, Zhang L. 2008. Systematic errors in global radiosonde precipitable water data from comparisons with ground-based GPS measurements. J Climate, 21: 2218-2238
- Webb F H, Zumbege J F. 1997. An introduction to GIPSY/OASIS-II, Jet Propulsion Laboratory User Manual. JPL Publication D-11088
- Zhai P, Eskridge R E. 1997. Atmospheric water vapor over China. J Climate, 10: 2643-2652