

王洪,雷恒池,杨超,等.济南地区大气可降水量三种观测反演资料的对比分析[J].海洋气象学报,2017,37(2):83-89.  
Wang Hong, Lei Hengchi, Yang Chao, et al. A comparison of datasets of precipitable water vapor over Jinan retrieved by three kinds of equipments [J]. Journal of Marine Meteorology, 2017, 37(2): 83-89. DOI: 10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2017.02.010. (in Chinese)

## 济南地区大气可降水量三种观测反演资料的对比分析

王洪<sup>1</sup>,雷恒池<sup>2</sup>,杨超<sup>3</sup>,宋永鹏<sup>1</sup>,孟金<sup>1</sup>,徐晓琳<sup>1</sup>

(1. 山东省气象信息中心,山东 济南 250031; 2. 中国科学院大气物理研究所云降水物理与强风暴实验室,北京 100029; 3. 山东省气象局,山东 济南 250031)

**摘要:** 大气可降水量在研究大气辐射和吸收,以及全球的热量输送,尤其是暴雨的预报预测等方面都发挥着重要作用。应用2015年章丘站GPS/MET、微波辐射计和L波段探空3种设备反演的大气可降水量数据,比较了三者之间的偏差特征。结果表明:GPS/MET、微波辐射计和L波段探空3种设备反演的大气可降水量变化趋势一致,但也存在明显的系统偏差,量值从大到小分别是GPS/MET、微波辐射计、L波段探空。三者之间的偏差在春夏秋冬四季的差值都较为稳定;GPS/MET比微波辐射计偏大4.5 mm左右,不会因为季节的改变而明显地增大或减小。但标准差最大是夏季,其次是秋季,冬季最小。由于12:00 UTC水汽含量大于00:00 UTC,造成3种探测手段反演的大气可降水量在12:00 UTC的标准差几乎总是大于00:00 UTC,而相对偏差小于等于00:00 UTC。

**关键词:** 大气可降水量; GPS/MET; 微波辐射计; 探空

**中图分类号:** P412.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-3599(2017)02-0083-07

**DOI:**10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2017.02.010

## A comparison of datasets of precipitable water vapor over Jinan retrieved by three kinds of equipments

WANG Hong<sup>1</sup>, LEI Hengchi<sup>2</sup>, YANG Chao<sup>3</sup>, SONG Yongpeng<sup>1</sup>, MENG Jin<sup>1</sup>, XU Xiaolin<sup>1</sup>

(1. Shandong Provincial Meteorological Information Center, Jinan 250031, China; 2. Key Laboratory of Cloud-Precipitation Physics and Severe Storms, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China; 3. Shandong Provincial Meteorological Bureau, Jinan 250031, China)

**Abstract** Precipitable water vapor is one of the key factors in study of atmospheric radiation transfer and absorption, global wide heat transfer, and prediction of heavy rainfall. Using precipitable water vapor data in 2015 retrieved by GPS/MET, microwave radiometer and L-band sounding respectively at Zhangqiu Station, the characteristics of the 3 kinds of datasets are studied. The results show that the variation trends of the 3 kinds of datasets are similar, but with significant systematic deviations. The mean values of precipitable water vapor from big to small are retrieved by GPS/MET, microwave radiometer and L-band sounding respectively. The mean deviations among the three kinds of datasets have little changes in different seasons, while the mean deviation of dataset retrieved by GPS/MET from dataset retrieved by microwave radiometer is about 4.5 mm. However, there are significant seasonal changes in the spread of deviation, which reaches its largest value in summer, followed by autumn, spring and winter. Since atmospheric water vapor content at 12:00 UTC is greater than that at 00:00 UTC, the spread of deviation

收稿日期:2017-04-10; 修订日期:2017-06-09

基金项目:山东省气象局科研项目(2014SDQN07,2014SDQXZ03)

作者简介:王洪(1984—),女,硕士,工程师,主要从事大气遥感方面的研究,sdsqxjyqj@163.com。

of precipitable water vapor is always larger at 12:00 UTC than that at 00:00 UTC, and the relative error at 12:00 UTC is always less than or equal to that at 00:00 UTC.

**Key words** precipitable water vapor; GPS/MET; microwave radiometer; sounding

## 引言

大气中的水汽虽然所占比例很小,约为0.1%~3%,但却是大气中最活跃的成分,是气候和天气变化过程中的重要参量。当大气的温度变化时,水汽是唯一可以发生相态变化的大气成分。随着温度、压力的变化,水汽会发生三相变化,水汽的凝结、凝华会造成能量的释放,生成云、雨、雪等天气现象;当云、雾消散时,又从大气吸收热量,使得水汽在各种尺度的天气过程中发挥着重要作用。水汽的输送与扩散,也对云、降水等的形成起到至关重要的作用。大气中以不同相态存在的水有着更复杂的辐射作用,水汽凝结成不同性质的云,辐射特性也不同<sup>[1]</sup>。同时,水汽也是温室气体,地球上水汽总含量的长期变化可以作为全球气候变化的一个指标<sup>[2]</sup>。水汽的这些特性,使监测水汽在天气和气候研究中占有重要的位置。

地面以上大气柱中的水汽总含量为大气可降水量,其量值反映了大气中水汽含量的丰富程度,是产生降水的基础,也是评估空中水资源的重要依据<sup>[3]</sup>。大气可降水量在研究大气辐射和吸收、全球的热量输送、天气与气候的预报预测等方面都发挥着重要作用<sup>[4]</sup>,同时,大气可降水量是地面降水的来源,一定程度上决定着不同区域和时间条件下水资源的丰富程度和分布特征,对人工影响天气作业指挥有指示性的作用。更加科学地开发空中水资源,有效地调节降水的时空分布,可以提高水资源的使用效率<sup>[5]</sup>,因此对大气降水量的实时监测显得尤为重要。目前业务上对大气降水量的探测主要有L波段探空雷达、地基GPS/MET、微波辐射计三种手段,开展不同资料反演的大气可降水量精度检验是有必要的。向玉春等<sup>[6]</sup>计算的宜昌站GPS/MET比探空计算结果偏大5.6%。胡姮等<sup>[7]</sup>对比了4个站点的GPS/MET与探空资料,其中安庆、恩施两站GPS/MET比探空值小,而河池、民勤两站GPS/MET比常规探空偏大。徐桂荣等<sup>[8]</sup>对比了湖北省咸宁市气象局黑山观测站微波辐射计、探空和GPS/MET探测的大气可降水量,发现三者从大到小依次为探空、微波辐射计、GPS/MET。卢会国等<sup>[9]</sup>对阳江探空比对试验资料分析,得出国内探

空仪水汽测量值的变幅明显高于GPS/MET。GPS/MET、微波辐射计和常规探空探测大气可降水量的偏差特征与观测站点、仪器型号、探测时段等有关,不同学者得出的偏差特征存在差异。本文基于2015年全年山东省济南章丘站L波段探空雷达、地基GPS/MET、微波辐射计数据,评估济南地区3种探测设备反演大气可降水量产品的偏差特征,旨在为气象业务人员使用该类数据提供更多的数据质量参考。

## 1 资料选取与处理

### 1.1 L波段探空雷达

L波段探空雷达为GFE(L)型雷达-GTS1型数字式电子探空仪高空气象探测系统,采用二次测风雷达测距体制,能够连续观测气温、湿度、气压、风速等气象要素<sup>[10-11]</sup>。探空测量是在不同时间、不同地点进行的,探空气球上升到10 km所需的时间一般约为25 min,同时也会飘离到气球施放地点下方十几到几十千米外<sup>[12]</sup>。定金才<sup>[13]</sup>指出,探空水汽积分量大致反映的是30 min内,高度在8 km、水平半径为30 km的大气柱水汽含量的平均状态。

L波段探空资料没有直接的大气可降水量产品,本文根据刘旭春等<sup>[14]</sup>、向玉春等<sup>[6]</sup>提出的内插水汽压方法计算得到大气可降水量。

### 1.2 微波辐射计

微波辐射计为德国RPG公司研制的RPG-HATPRO-G3地基多通道微波辐射计,采用多通道并行测量技术。通过测量亮温可以反演大气变量,统计反演方法采用多元线性回归、二次回归或神经网络的方法,本研究中微波辐射计反演方法选择的是神经网络方法。

微波辐射计无需值守,可长期观测,得到高时间分辨率的水汽含量产品,是目前探测大气水汽含量最为准确的一种基本设备<sup>[15]</sup>。微波辐射计受环境温度的影响较大,温度越低,微波辐射越强,所以测量时受背景温度的影响使得在地面附近的探测精度较低<sup>[16]</sup>。微波辐射计受降水的影响较大,在降水发生时,雨水附着在仪器窗口上,会影响天线探测精度,使得反演数据失真<sup>[17]</sup>。即便是很弱的降水也会使天顶方向微波辐射计V波段亮温的误差信

号达到饱和,致使水汽反演结果产生很大的偏差<sup>[18]</sup>。因此,为了避免降水对微波辐射计的影响,分析时需将降水影响的时次数据剔除,具体根据微波辐射计资料中的降水标示(0 为无降水,1 为有降水),认为降水时段及降水开始前 1 min 和降水结束后 1 min 的大气可降水量产品不可用。

### 1.3 地基 GPS/MET

地基 GPS/MET 站点是与济南测绘院共建站点,设备生产厂家为美国天宝公司。GPS 卫星发射的无线电波在穿过大气层时,受到电离层电子、平流层和对流层大气的折射延迟。通过测量对流层延迟,大气静力学延迟可以利用模型估计出大气的湿延迟,利用湿延迟和水汽含量的关系,可以连续监测大气的水汽含量<sup>[19]</sup>,其时间分辨率一般为 30 min。

对 GPS/MET 数据进行质量控制,剔除 GPS/MET 数据的异值,异值的定义:单个数据值突增 30 mm 以上,且在下一个数据点下降到突增前的值上下 10 mm。

### 1.4 统计量

将 GPS/MET、微波辐射计、L 波段探空三者大气可降水量反演值的偏差进行定量分析,采用以下方法,从不同角度检验 3 种探测手段的偏差特征。

平均偏差,即偏差的平均值:

$$BIAS = \frac{\sum_{i=1}^n (a_i - b_i)}{n} \quad (1)$$

偏差的标准差(Standard Deviation),也称偏差的均方差(Mean Square Error):

$$SD = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (a_i - b_i - BIAS)^2}{n}} \quad (2)$$

相对方差:

$$EPCE = 100\% \times \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (a_i - b_i)^2}{\sum_{i=1}^n (b_i)^2}} \quad (3)$$

其中, $n$  为样本数,由下文可知  $n = 730$ ,  $a$  和  $b$  分别为 3 种探测手段中其中两者的大气可降水量探测值。

本文所用资料为 2015 年 1 月 1 日—12 月 31 日上述 3 种资料,其中 L 波段探空和地基 GPS/MET 设备在同一观测站内,即济南章丘气象局观测场,微波辐射计距离该观测场直线距离约 50 km。因此,对于这三种观测手段的对比检验时,结果除了

包含真正的误差外,也包含探测设备本身的内在差异和外在观测距离的不同导致的差异。

2015 年全年 L 波段探空数据为 730 次观测,其中 6 次为空值,时间分辨率为 12 h;微波辐射计采集到 358 d 数据,资料的时间分辨率为 1~3 s,资料样本数为 10 628 479;GPS/MET 采集到 17 519 次观测数据,其中有 2 135 次观测为空值,有效数据为 15 384 次,时间分辨率为 30 min。由于 L 波段探空资料在 00 时和 12 时(UTC)各一次,时间分辨率最低,3 种探测手段对比分析时,选取 GPS/MET 在 00:00 UTC 和 12:00 UTC 的数据、L 波段探空数据、微波辐射计在 00:00—00:30 和 12:00—12:30 两个观测时段的平均值三者进行匹配分析。

## 2 结果分析

### 2.1 偏差的年变化

图 1 给出 GPS/MET、微波辐射计和 L 波段探空三者 2015 年大气可降水量的时间序列图。三者总体的变化趋势是一致的,全年呈现先增加后减小的特点。大气可降水量从 4 月 10 mm 左右开始逐渐增大,虽有波动,但是增大趋势明显,夏季 7—8 月达到峰值,最大可达到 70 mm 以上,8 月以后开始迅速下降。但是三者也存在明显的差异性,GPS/MET 探测到的水汽含量值高于微波辐射计和 L 波段探空,微波辐射计和 L 波段探空值较为一致。

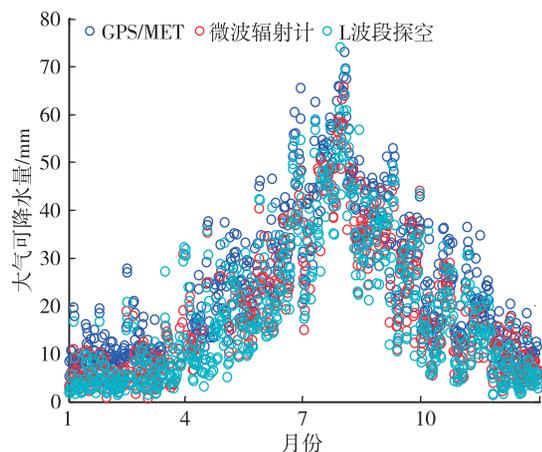


图 1 2015 年章丘站大气可降水量  
Fig.1 Precipitable water vapor of Zhangqiu station in 2015

下面对 GPS/MET、微波辐射计、L 波段探空反演获取的大气可降水量值之间的偏差统计,表 1 给出了三者的偏差统计值。从表 1 中可以看出,三者的相关系数( $R$ )较高,都达到了 97% 以上。微波辐射计和 L 波段探空之间的平均偏差最小,为 1.36

mm;标准差为 2.62 mm;相对方差也最小,为 13.06%。说明微波辐射计和 L 波段探空之间一致性较高,离散程度也较低。而 GPS/MET 相对于微波辐射计和探空呈现水汽含量值偏大的特点,虽然 GPS/MET 与其余两者的平均偏差较大,分别为

表 1 GPS/MET、微波辐射计、L 波段探空反演的大气可降水量之间的偏差统计

Table 1 Precipitable water vapor deviation statistics among GPS/MET, microwave radiometer and L-band sounding

	BIAS/mm	SD/mm	EPCE/%	R/%	拟合方程
GPS/MET—微波辐射计	4.67	3.02	22.49	97.79	$Y=0.97x+3.97$
微波辐射计—L 波段探空	1.36	2.62	13.06	98.31	$Y=0.96x-0.73$
L 波段探空—GPS/MET	-5.97	2.80	22.30	98.34	$Y=0.98x+6.42$

## 2.2 偏差的季节变化

为了进一步分析不同探测手段反演的大气可降水量在不同季节的偏差特征,下面分析 GPS/MET、微波辐射计、L 波段探空在春、夏、秋、冬四季的偏差特征。季节划分标准为:3—5 月为春季;6—8 月为夏季;9—11 月为秋季;12 月—次年 1 月为冬季。图 2 给出了不同季节 GPS/MET、微波辐射计、L 波段探空反演的大气可降水量的时间序列图。无

4.67 mm 和 -5.97 mm;但标准差不大,分别为 3.02 mm 和 2.80 mm,即离散程度不大。说明 GPS/MET 与其余两种探测方法之间存在一个稳定的系统误差,即研究所选取的济南章丘站点 GPS/MET 反演的大气可降水量值有整体偏高的误差特点。

论哪个季节,三者的变化趋势吻合较好,波峰和波谷有较好的对应性。但红色的 GPS/MET 值略高于微波辐射计和 L 波段探空;尤其是在整个冬季, GPS/MET 高于另外两者,微波辐射计和 L 波段探空之间差别不明显。

下面定量分析三者在不同季节的偏差特征,从表 2 中可以看到,大气可降水量探测值从大到小分别是 GPS/MET、微波辐射计、L 波段探空。

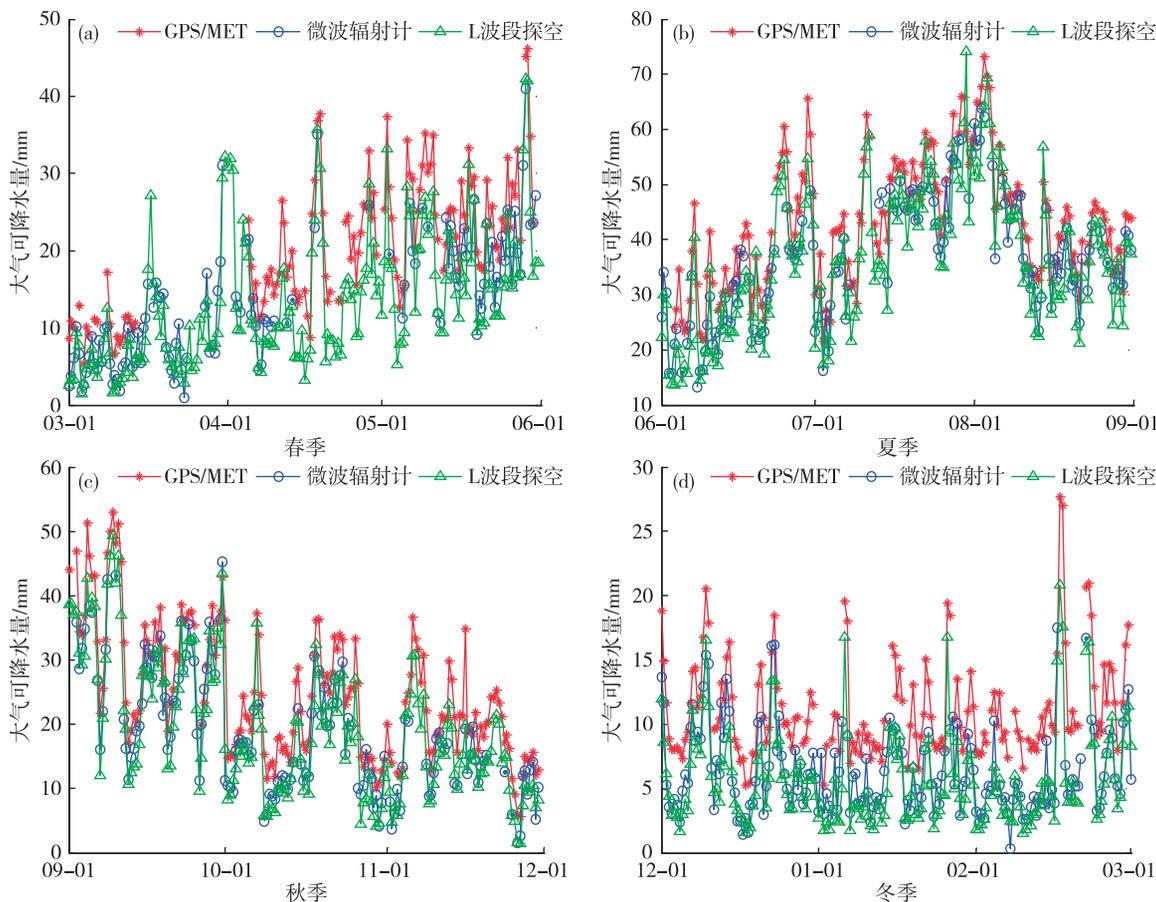


图 2 2015 年章丘站不同季节 GPS/MET、微波辐射计、L 波段探空反演的大气可降水量

Fig.2 Precipitable water vapor of Zhangqiu station in four seasons in 2015

GPS/MET与微波辐射计之间的偏差,春、夏、秋、冬分别为4.98 mm、4.83 mm、4.65 mm、4.41 mm,差值较为稳定;标准差最大是夏季,其次是秋季,冬季最小,主要原因是夏季大气可降水量平均值大,振幅也大,而冬季的平均值较小;但是相对方差却恰恰相反且相差显著,冬季最大(63.18%),春、秋季次之(29.56%、27.58%),最小是夏季(15.21%),说明GPS/MET比微波辐射计的值偏大4.5 mm左右,不会因为季节的改变而明显地增大或减小,即偏差不会因为大气可降水量值的大小而改变,因此冬季大气可降水量少时,相对方差很大。同理,L波段探空和GPS/MET,两者之间也存在较大的系统偏差;而微波辐射计和L波段探空之间偏差较小,最大偏差夏季1.86 mm,最小冬季0.98 mm。

综上所述,3种探测设备反演的大气可降水量值从大到小依次为GPS/MET、微波辐射计、L波段探空,这种偏差为系统偏差,平均偏差值春、夏季略高,秋、冬季略低。但相对于大气可降水量值来说,平均偏差总是维持在一个相对稳定的水平上,即GPS/MET比微波辐射计偏大4.5 mm左右,比L波段探空偏大6 mm左右,微波辐射计比L波段探空偏大1 mm左右。相对方差都是冬季最大,春、秋季次之,夏季最小。

2.3 偏差的日变化

由于L波段探空每天只有两次探测数据,00:00 UTC和12:00 UTC,因此将GPS/MET和微波辐射计对应时次的数据与探空进行对比。宋淑丽<sup>[20]</sup>指出每天00:00 UTC和12:00 UTC这两个时刻正好是目前GPS资料处理弧段的两端点,也就是端部效应,会影响GPS/MET的探测精度。图3给出三者

在00:00 UTC和12:00 UTC的偏差分布,可以看到,2.2节中提到的偏差特征依然存在,即GPS/MET、微波辐射计、L波段探空三者的大气可降水量值依次减小。值得注意的是,12:00 UTC偏差的离散程度大于00:00 UTC。

表2 GPS/MET、微波辐射计、L波段探空反演的大气可降水量在不同季节的偏差统计

Table 2 The deviation statistics of precipitable water vapor inverted by GPS/MET, microwave radiometer and L-band sounding in four seasons

	季节	BIAS/mm	SD/mm	EPCE/%
GPS/MET— 微波辐射计	春季	4.98	2.90	29.56
	夏季	4.83	3.59	15.21
	秋季	4.65	3.52	27.58
	冬季	4.41	1.78	63.18
微波辐射计— L波段探空	春季	1.54	2.46	14.64
	夏季	1.86	3.67	9.45
	秋季	1.14	2.38	10.82
L波段探空— GPS/MET	冬季	0.98	1.36	21.71
	春季	-6.68	2.37	31.75
	夏季	-6.20	3.89	16.41
GPS/MET	秋季	-5.76	2.65	23.59
	冬季	-5.38	1.37	47.15

表3给出了GPS/MET、微波辐射计、L波段探空反演的大气可降水量在不同时次偏差的定量统计值。通过对00:00 UTC和12:00 UTC时偏差统计发现,GPS/MET和L波段探空之间的平均偏差值最大,微波辐射计和L波段探空空间的偏差值最小。12:00 UTC的标准差总是大于00:00 UTC,而相对偏差小于等于00:00 UTC,这主要是因为12:00

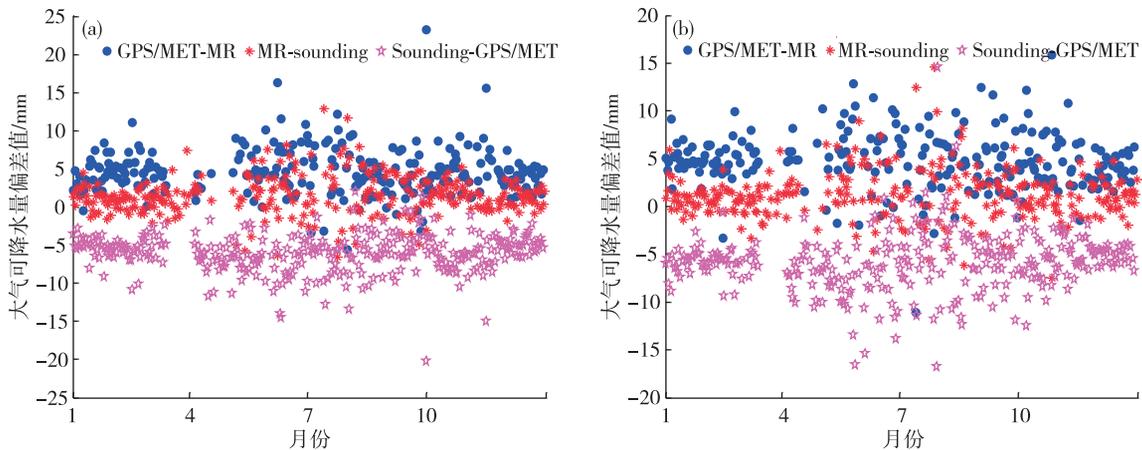


图3 2015年章丘站在不同时次GPS/MET、微波辐射计、L波段探空反演的大气可降水量之间的偏差(MR指微波辐射计;Microwave Radiometer)(a. 00:00 UTC, b. 12:00 UTC)

Fig.3 Precipitable water vapor of Zhangqiu station at 00:00 UTC(a) and 12:00 UTC(b) in 2015

UTC 水汽含量大于 00:00 UTC, 其相应的振幅也较大。

表3 GPS/MET、微波辐射计、L波段探空反演的大气可降水量在不同时次的偏差统计

Table 3 Precipitable water vapor deviation statistics among GPS/MET, microwave radiometer and L-band sounding at 00:00 UTC and 12:00 UTC

	时次(UTC)	BIAS/mm	SD/mm	EPCE/%
GPS/MET—	00:00	4.56	3.02	22.57
微波辐射计	12:00	4.77	3.01	22.24
微波辐射计—	00:00	1.50	2.55	11.45
L波段探空	12:00	1.17	2.60	10.37
L波段探空—	00:00	-6.06	2.50	22.68
GPS/MET	12:00	-5.89	3.09	21.92

### 3 偏差产生的原因

L波段探空比起另外两种仪器反演的大气可降水量有偏低特征,唐南军等<sup>[21]</sup>利用2008年12月—2009年11月中国91个L波段探空站的数据发现:L波段探空系统在对流层中下层出现异常偏干的现象,不是个例,而是具有相当的普遍性。L波段的这种偏干已经超出了大气中可能出现的自然异常,主要是由于湿度传感器的不良性能造成的,并与探空气球穿过的云层云型特征相关。这也是各国目前存在的普遍性问题,与湿度传感器低温性能不好,低温易冻结失效,灵敏性差,尤其是探测不到卷云时较高的相对湿度<sup>[21-23]</sup>有关。此外,在利用探空资料计算大气可降水量时,采用内插水汽压的方法<sup>[14,6]</sup>,这样使得计算的大气可降水量PWV偏低。因此探空反演的大气可降水量值总是偏小。

GPS/MET反演的大气可降水量呈现出明显偏大的特点,这可能与反演时参数的设定有关。在利用GPS湿延迟(Zenith Wet Delay, ZWD)推算PWV时,转换系数 $\Pi$ 的精度直接影响PWV的精度: $PWV = \Pi \times ZWD$ ,而 $\Pi$ 又由加权平均温度 $T_m$ 计算得到,因此只有准确确定 $T_m$ 值,才能确保 $\Pi$ 的精度<sup>[24]</sup>。 $T_m$ 的精度应根据当地的气候特点<sup>[25]</sup>,计算出局地的回归公式,这也是今后要解决的主要问题。

微波辐射计在无降水时段反演的大气可降水量较为稳定,但也存在一定的系统误差源。微波辐射计在温度降低时,如夜间,水汽发生凝结,天线罩上的水滴散射、发射、吸收等的影响,会使观测的亮温偏差较大,这种偏差会通过反演模型进行传递,进而影响其探测的准确度<sup>[26]</sup>。

3种探测手段不同的反演原理也是误差的来源之一;对比时的计算方法也存在一定的误差源,如设备间的观测距离、观测时间等。另外,晴、雨天气的过渡期,相对湿度的变化较快,不同仪器采样时间的不同会导致较大的系统偏差。

### 4 小结

1)2015年,GPS/MET、微波辐射计和L波段探空3种设备反演的大气可降水量变化趋势一致,三者的相关系数较高,都达到了98%以上。同时,也存在明显的差异性,GPS/MET探测到的水汽含量值高于微波辐射计和L波段探空,微波辐射计和L波段探空趋势较为一致。

2)大气可降水量探测值从大到小分别是GPS/MET、微波辐射计、L波段探空。GPS/MET与微波辐射计、L波段探空之间的偏差在春、夏、秋、冬四季的差值都较为稳定;GPS/MET比微波辐射计的值偏大4.5mm左右,不会因为季节的改变而明显地增大或减小。但标准差最大是夏季,其次是春、秋季,冬季最小。微波辐射计和L波段探空之间偏差较小且相对稳定,最大偏差夏季为1.86mm,冬季最小,为0.98mm。

3)由于12:00 UTC水汽含量大于00:00 UTC,造成3种探测手段反演的大气可降水量在12:00 UTC的标准差几乎总是大于00:00 UTC,而相对偏差小于等于00:00 UTC。

### 参考文献:

- [1] 张弓,许健民,黄意玢.用FY-1C两个近红外太阳反射光通道的观测数据反演水汽总含量[J].应用气象学报,2003,14(4):385-394.
- [2] 袁招洪.GPS资料在中尺度数值预报模式中的应用研究[D].南京:南京气象学院,2004.
- [3] 马新平,尚可政,李佳耘,等.1981—2010年中国西北地区东部大气降水量的时空变化特征[J].中国沙漠,2015,35(2):448-455.
- [4] 杨景梅,邱金桓.用地面湿度参量计算我国整层大气可降水量及有效水汽含量方法的研究[J].大气科学,2002,26(1):9-22.
- [5] 王维佳,陈碧辉.四川上空大气可降水量时空分布特征[J].高原山地气象研究,2010,30(3):52-57.
- [6] 向玉春,陈正洪,徐桂荣,等.三种大气可降水量推算方法结果的比较分析[J].气象,2009,35(11):48-54.
- [7] 胡姮,李伟,曹云昌.地基GPS与常规探空所测降水量的对比分析[J].气象水文海洋仪器,2013,30(1):

- 45-48.
- [8] 徐桂荣,孙振添,李武阶,等.地基微波辐射计与GPS无线电探空和GPS/MET的观测对比分析[J].暴雨灾害,2010,29(4):315-321.
- [9] 卢会国,李国平,蒋娟萍.阳江国际探空试验的GPS、探空、微波辐射计水汽资料对比分析[J].气象科技,2014,42(1):159-163.
- [10] 李伟,李峰,赵志强,等.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,2009.
- [11] 蔡淼,欧建军,周毓荃,等.L波段探空判别云区方法的研究[J].大气科学,2014,38(2):213-222.
- [12] 吴蕾,陈洪滨,康雪.风廓线雷达与L波段雷达探空测风对比分析[J].气象科技,2014,42(2):225-230.
- [13] 定金才.GPS气象学及其应用[M].北京:气象出版社,2009.
- [14] 刘旭春,王艳秋,张正禄.利用GPS技术遥感哈尔滨地区大气可降水量的分析[J].测绘通报,2006(4):10-12.
- [15] 李国平.地基GPS遥感大气可降水量及其在气象中的应用研究[D].成都:西南交通大学,2007.
- [16] 王亚辉.地基GPS技术反演大气可降水量的研究[D].赣州:江西理工大学,2012.
- [17] 张秋晨,龚佃利,冯俊杰.RPG-HATPRO-G3地基微波辐射计反演产品评估[J].海洋气象学报,2017,37(1):104-110.
- [18] 陈英英,杨凡,徐桂荣,等.基于雨雪天气背景的微波辐射计斜路径与天顶观测的反演结果对比分析[J].暴雨灾害,2015,34(4):375-383.
- [19] 曹云昌,陈永奇,李炳华,等.利用地基GPS测量大气水汽廓线的方法[J].气象科技,2006,34(3):241-245.
- [20] 宋淑丽.地基GPS网对水汽三维分布的监测及其在气象学中的应用[D].上海:中国科学院研究生院(上海天文台),2004.
- [21] 唐南军,刘艳,李刚,等.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,2014,30(4):643-653.
- [22] Miloshevich L M, Vomel H, Whiteman D N, et al. Accuracy assessment and correction of Vaisala RS92 radiosonde water vapor measurements[J]. J Geophys Res, 2009, 114(D11):1013-1033.
- [23] Wang J, Carlson D J, Parsons D B, et al. Performance of operational radiosonde humidity sensors in direct comparison with a chilled mirror dew-point hygrometer and its climate implication[J]. Geophys Res Lett, 2003, 30(16):11(1)-11(4).
- [24] 王晓英,戴仔强,曹云昌,等.中国地区地基GPS加权平均温度 $T_m$ 统计分析[J].武汉大学学报(信息科学版),2011,36(4):412-416.
- [25] 曲建光,吴壮.从GPS推算大气水汽的误差分析[J].测绘工程,2001,10(4):24-26.
- [26] 张文刚,徐桂荣,颜国跑,等.微波辐射计与探空仪测值对比分析[J].气象科技,2014,42(5):737-741.