

李光伟,黄彦彬,敖杰,等,2018. GPS 探测与 FY-2 反演大气可降水量对比分析[J]. 气象,44(8):1082-1093.

GPS 探测与 FY-2 反演大气可降水量对比分析*

李光伟^{1,2} 黄彦彬¹ 敖杰¹ 邢峰华¹ 毛志远¹

1 海南省人工影响天气中心,海口 570203

2 海南省气象科学研究所,海口 570203

提 要: 为深入了解 FY-2 卫星大气可降水量(PW)的反演质量,文章选取 2012 和 2015 年地基 GPS 水汽观测数据,与 FY-2 的 PW 反演产品进行了对比分析。结果表明:(1)北京、武汉和海口三站 GPS/PW(PW_{GPS})与 FY-2/PW(PW_{FY-2})在夏季存在显著正相关,三站的相关系数都达到 0.67 以上,夏季 PW 的均方根误差值、月平均偏差绝对值均小于冬季。北京与武汉站 PW 平均偏差和均方根误差在四季均具有明显日变化特征;(2)当 $PW_{GPS} > 20$ mm 时,北京、武汉、海口和拉萨站 FY-2/PW 与 GPS/PW 比较一致,PW 偏差均值的绝对值和均方根误差较小,当 $PW_{GPS} < 20$ mm 时,PW 偏差均值绝对值和均方根误差随 PW_{GPS} 值减小而迅速变大。FY-2 的 PW 产品在夏季可以为大部分区域提供高时空分辨率、高精度的大气可降水量,在大气湿度非常低、冬季和夜间条件,反演结果精度有待提高。

关键词: 大气可降水量, FY-2 卫星, 地基 GPS, 水汽含量, 水汽

中图分类号: P412

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2018.08.010

Comparison of Precipitable Water Retrieved by FY-2 Satellite and GPS Observations

LI Guangwei^{1,2} HUANG Yanbin¹ AO Jie¹ XING Fenghua¹ MAO Zhiyuan¹

1 Weather Modification Center of Hainan Province, Haikou 570203

2 Hainan Institute of Meteorological Sciences, Haikou 570203

Abstract: In order to better understand the quality of precipitable water retrieved from FY-2 satellite data (FY-2/PW), the comparison research is done in this study between the FY-2/PW and GPS/PW collected in 2012 and 2015. The results indicate that: (1) the two datasets are highly correlated at three stations (Beijing, Wuhan and Haikou) with correlation coefficients more than 0.67 in summer. The values of PW RMSE and monthly mean bias are less in summer than in winter. The bias and RMSE of PW for four seasons exhibited a pronounced diurnal variation in Beijing and Wuhan. (2) When the value of GPS/PW is greater than 20 mm, FY-2/PW agrees well with GPS/PW at Beijing, Wuhan, Haikou and Lhasa Stations. On the other hand, when the value of GPS/PW is less than 20 mm, the absolute values of PW bias and RMSE quickly increase with the decrease of GPS/PW. All the results show that the accuracy of FY-2/PW tends to be high in summer, but the retrieval results need some improvement in the conditions of low atmospheric humidity, winter and night.

Key words: precipitable water (PW), FY-2 satellite, ground-based GPS, water vapor content, water vapor

* 海南省财政科技计划项目(417299)、海南省气象局科技创新项目(HN2013MS15)、公益性行业(气象)科研专项(GYHY201406033-04)和中国气象局华南区域气象科技攻关项目(GRMC2014M15)共同资助

2017 年 3 月 8 日收稿; 2018 年 3 月 27 日收修定稿

第一作者:李光伟,主要从事卫星遥感及人工影响天气研究. Email: gwylee@gmail.com

引言

大气中的水汽是一种重要的温室气体,在辐射收支、水循环和天气气候中扮演关键角色,精确探测水汽有重要意义。大气可降水量(precipitable water, PW),又称为柱水汽含量,所表示的是若地表单位面积上空气柱内包含的水汽,全部凝结成降水落下所形成的水层深度,是一个有广泛应用的重要参量(郑斯中和杨德卿,1962;Liu et al,2005)。长期以来,探空观测是大气水汽探测的主要手段(郑斯中和杨德卿,1962;杨景梅和邱金桓,2002),探空方法比较精确,但探空站点个数和日探测次数都比较少是其主要缺点。其他方法也常为研究者所采用,如基于地面湿度参量计算(杨景梅和邱金桓,2002;申彦波等,2016),地基GPS反演(Bevis et al,1992;毛节泰,1993;李成才等,1999;王继竹等,2014),卫星遥感反演(Jedlovec,1990;Suggs et al,1998;李万彪等,1998;师春香和谢正辉,2005)及再分析资料计算(李光伟等,2015;王雨等,2015;陈丹等,2016;任倩等,2017)等。尤其近年来,Terra卫星的MODIS,Aqua卫星的AIRS等卫星探测提供了包括大气可降水量在内的高空间分辨率水汽估计产品(Gao et al,1992;Parkinson,2003;谷晓平等,2009)。

在过去,通常是采用空间和时间相匹配的探空观测来对卫星水汽反演产品进行检验。探空观测可以提供湿度廓线和大气可降水量(PW)产品,可作为卫星反演的湿度产品(如大气可降水量)检验研究的一个基础(Kleespies and McMillin,1990;Divakarla et al,2006;McMillin et al,2007)。地基GPS提供了大气可降水量估计,可以利用GPS观测对水汽进行连续监测(Bevis et al,1992;毛节泰,1993;李成才等,1999;Rocken et al,1997;Bastin et al,2005)。相对于探空观测,地基GPS大气水汽探测具有高时间分辨率、高精度和全天候的特点(毛节泰,1993;梁宏等,2006)。近年来,许多研究者利用探空、地基GPS、太阳光度计等观测对MODIS等卫星反演水汽产品进行了广泛的对比检验(Li et al,2003;King et al,2003;Prasad and Singh,2009;Thomas et al,2011)。利用地基GPS探测对印度地区MODIS和AIRS水汽产品检验结果显示,MODIS反演的近红外和红外水汽产品相比地基GPS探测均存在高估(Prasad and Singh,2009)。谷晓

平等(2009)指出贵州地区从MODIS仪器第18和19两个波段表观反射率反演的大气可降水量比EOS网站发布的MODIS近红外水汽反演结果更接近实际探测的结果。Raja et al(2008)利用2004年6个月地基GPS水汽数据对AIRS大气可降水量产品进行了检验,发现与地基GPS探测相比,AIRS探测对美国地区大气可降水量估计结果存在系统性季节偏差,并讨论了空间和时间匹配对偏差、均方根误差的影响。闵文彬等(2015)利用探空数据对FY-2E的PW产品在青藏高原东南部地区可靠性进行了分析。

FY-2静止卫星反演的晴空大气可降水量产品具有较高时间分辨率(3 h)和较高空间分辨率(10 km)的特点(许健民等,2008)。FY-2卫星大气可降水量产品在干旱、暴雨预报等业务中有重要应用,但缺乏对其精度和在不同地区适用性的详细对比分析。本文利用北京、武汉、海口和拉萨四站地基GPS水汽探测,研究了FY-2卫星晴空大气可降水量产品的变化和精度。对两个独立数据集作了偏差、均方根误差和相关系数的对比分析,并进一步对FY-2卫星水汽产品进行了详细的月、季节和日变化分析与检验。结合月(干、湿)和季节观测偏差的主要变化趋势对FY-2卫星大气可降水量产品的相对精度及偏差原因进行了分析,以期对FY-2卫星水汽产品反演精度的提高和在天气预报等业务中进一步应用提供参考依据。

1 资料和方法

1.1 资料介绍

本文选取了气候具有代表性且同时具有探空和地基GPS观测的北京、武汉、海口和拉萨四个典型站点进行分析。研究使用的实测对比资料包括探空资料和地基GPS水汽资料。探空大气可降水量数据利用美国国家气候数据中心提供的全球站点无线电探空资料数据集(IGRA)计算得到(Durre et al,2009)。FY-2卫星反演晴空大气可降水量产品来自国家卫星气象中心,主要使用了FY-2E卫星数据,由于卫星调整,2015年部分数据来自FY-2G探测(6—12月),空间分辨率为 $0.1^{\circ} \times 0.1^{\circ}$,FY-2卫星大气可降水量产品采用红外分裂窗物理反演算法反演(Suggs et al,1998;李万彪等,1998;师春香和谢正

辉,2005)。该产品数据只有在晴空条件下有效,有云时数据为无效数据,时间分辨率为 8 次/天(许健民等,2008)。北京、武汉等 IGS 跟踪站数据及精密星历数据从 IGS 网站(<http://www.igs.org/>)下载。海口地基 GPS 观测站资料由海口市气象局提供,本文选取地基 GPS 观测的时间段为海口站资料较齐全的 2012 和 2015 年,地基 GPS 资料时间分辨率为 0.5 h 一次。为了与 FY-2 卫星晴空大气可降水量产品时次一致,探空和地基 GPS 观测也仅选取与 FY-2 相匹配的晴空条件下的观测数据。

1.2 地基 GPS 和卫星反演大气可降水量

Bevis et al(1992)首先提出了采用地基 GPS 探测遥感大气降水量的原理。国内许多研究者对用地基 GPS 资料反演大气降水量的方法进行了详细叙述(Bevis et al,1992;毛节泰,1993;李成才等,1999;梁宏等,2006;Li et al,2003)。地基 GPS 反演大气可降水量基本原理可简述为,当 GPS 卫星信号传输经过大气层时,会受到大气的折射而产生时间延迟,大气延迟量可划分为电离层延迟和对流层总延迟。对流层总延迟包括两部分:静力延迟和湿项延迟。通过采用双频技术可以精确确定电离层延迟。利用地面气压、地理纬度和海拔高度,通过静力延迟模型可以得到精确的天顶静力延迟项,天顶对流层延迟中减去天顶静力延迟项可得到毫米量级的湿项延迟(李成才等,1999)。湿项延迟与大气可降水量可建立严格的正比关系,从而求解出精确的大气可降水量。

本研究采用 GAMIT/GLOBK 软件进行 GPS 数据解算,GAMIT/GLOBK 是由美国麻省理工学院和斯克里普斯海洋研究所联合研制的高精度 GPS 处理软件。为提高解算精度,同时使用了上海、乌鲁木齐和拉萨等长基线跟踪站数据和精密星历数据来参与解算。解算流程主要包括:数据准备、参数表文件准备、解算延迟项和 GPS 大气降水量的反演。数据准备包括:更新 table 目录数据,下载所需广播星历、精密星历及 IGS 站观测数据。解算湿项延迟时,静力延迟采用 Saastamoinen 静力学延迟模型计算(Saastamoinen,1972),利用 GAMIT 解算得到时间间隔 0.5 h 的天顶对流层延迟和湿项延迟,GPS 大气可降水量计算时,先利用地面气温与大气加权平均温度(T_m)的线性模型得到 T_m ,本文使用了通用的 Bevis T_m 模型(Bevis et al,1992),再

利用转换系数公式得到大气可降水量。

卫星遥感可以获取大尺度的大气可降水量数据,目前主要反演方法包括:近红外、热红外方法和微波方法。热红外方法是利用卫星 11 和 12 μm 的红外分裂窗通道反演大气可降水量,主要原理是水汽在两个通道存在吸收,两通道亮温差与大气可降水量有关(Suggs et al,1998;李万彪等,1998)。当云存在时,卫星红外通道接收的是云顶及以上大气发射的辐射,利用红外通道反演大气可降水量方法只适用于晴空条件。

红外分裂窗通道反演大气可降水量包括统计分裂窗反演方法和物理分裂窗反演方法,FY-2 晴空大气可降水量产品采用了物理分裂窗方法反演(师春香和谢正辉,2005;许健民等,2008)。云检测是实现大气可降水量反演的第一步。分裂窗反演大气降水量的物理方法主要原理是基于大气辐射传输方程,利用数学上的小扰动理论,将辐射传输方程转化为容易求解的线性方程,利用两红外通道卫星观测,通过求解二元线性方程组,得到相对于初始值的偏移量(Suggs et al,1998;李万彪等,1998;师春香和谢正辉,2005)。

1.3 质量控制与数据匹配

参考 Raja et al(2008)的方法,首先进行数据质量控制,剔除无效反演值。FY-2 卫星水汽产品与地基 GPS 观测数据对的匹配规则如下:FY-2 与 GPS 观测时间差小于 0.5 h;FY-2 产品位于距离 GPS 站点位置 0.15° 范围以内;FY-2 在晴空条件才反演水汽产品,因此当两个数据 PW 值都同时没有缺测,才进行匹配,否则数据对记为缺测。

1.4 地基 GPS 与探空对比

首先利用探空数据对地基 GPS 反演的大气降水量精度进行了检验。2012 和 2015 年北京、武汉、海口和拉萨四站 GPS 反演大气可降水量(简称 GPS/PW, PW_{GPS})和探空计算得到的大气可降水量(简称 IGRA/PW, PW_{IGRA})统计结果如表 1 所示。北京、武汉、海口和拉萨站相关系数分别为 0.972、0.966、0.936 和 0.938,显示了比较好的相关性。

除拉萨站外,其他三站平均偏差绝对值均小于 1 mm,其中北京站数值最小为 0.01 mm。海口和武汉站 GPS/PW 与 IGRA/PW 的平均偏差均为负值,GPS/PW 略大于 IGRA/PW。三站的均方根误差

表 1 2012 和 2015 年 GPS/PW 与 IGRA/PW 年相关性及相关统计

Table 1 Annual statistics and correlations between GPS/PW and IGRA/PW in 2012 and 2015

站名	配对样本数/个	平均偏差 ($PW_{IGRA} - PW_{GPS}$) /mm	PW_{IGRA} 平均值/mm	PW_{GPS} 平均值/mm	均方根误差/mm	线性回归		
						相关系数	斜率	截距
北京	967	0.01	18.12	18.11	3.59	0.972	1.00	0.04
武汉	1332	-0.28	31.15	31.43	4.88	0.966	0.90	3.40
海口	1032	-0.96	46.49	47.45	4.78	0.936	0.93	4.13
拉萨	1220	-3.46	9.06	12.52	4.39	0.938	1.06	2.91

范围为 3.5~4.9 mm,海口和北京站 GPS/PW 与 IGRA/PW 的均方根误差分别为 4.78 和 3.59 mm。线性回归结果显示,北京、武汉和海口站截距均为正值。PW 相对偏差(平均偏差占 IGRA/PW 平均值百分比)分别为 0.06%(北京)、-0.90%(武汉)和 -2.06%(海口)。北京、武汉和海口相对偏差绝对值均小于 2.1%。拉萨站的 PW 平均偏差绝对值为 -0.96 mm,较其他三站略偏大,可能原因是拉萨站高原无线电探空探测的 PW 自身存在明显“干偏差”(梁宏等,2012)。以上结果说明,四站 GPS/PW 与探空 IGRA/PW 均有较好的一致性,GPS 探测结果有较高的精度。GPS/PW 可作为站点大气可降水量的基准值,从而用于分析 FY-2 晴空大气可降水量(简称 FY-2/PW, PW_{FY-2})的适用性。

2 结果分析

2.1 PW/GPS 与 PW/FY-2 的年和季节对比

表 2 为利用 2012 和 2015 年数据计算的 GPS/PW 与 FY-2/PW 年、春季(3—5 月)、夏季(6—8 月)、秋季(9—11 月)和冬季(12—2 月)相关及统计结果。北京、武汉、海口和拉萨站 GPS/PW 与 FY-2/PW 数据对总数分别为 2364、2000、1643 和 1654 对。

与 GPS 探测结果相比,北京、武汉、海口和拉萨四站 FY-2/PW 产品全年平均偏差($PW_{GPS} - PW_{FY-2}$)均为负值,其中北京站平均偏差绝对值最大,为 11.22 mm,海口站平均偏差绝对值最小,为

表 2 不同站点 GPS/PW 与 FY-2/PW 季节相关及统计

Table 2 Seasonal statistics and correlations between GPS/PW and FY-2/PW at different stations

站名	季节	配对样本数/个	平均偏差 ($PW_{GPS} - PW_{FY-2}$) /mm	PW_{GPS} 平均值/mm	PW_{FY-2} 平均值/mm	均方根误差/mm	线性回归		
							相关系数	斜率	截距
北京	全年	2364	-11.22	13.23	24.44	22.39	-0.002	-0.00	24.48
	春季	609	-14.64	9.46	24.10	23.11	-0.313	-0.70	30.70
	夏季	540	2.67	29.63	26.96	6.63	0.815	0.78	3.82
	秋季	604	-4.11	12.02	16.13	13.48	-0.117	-0.14	17.85
	冬季	611	-27.11	3.68	30.78	34.49	-0.456	-4.03	45.61
武汉	全年	2000	-4.23	25.22	29.45	12.94	0.691	0.69	12.07
	春季	436	-1.92	23.91	25.83	9.23	0.583	0.55	12.67
	夏季	512	-0.96	45.04	46.00	5.28	0.906	1.05	-1.19
	秋季	504	1.05	21.46	20.41	6.78	0.786	0.79	3.41
	冬季	548	-13.98	11.19	25.17	21.79	-0.311	-0.92	35.47
海口	全年	1643	-0.89	42.03	42.92	5.50	0.892	0.81	8.95
	春季	247	-4.21	37.81	42.02	6.49	0.896	0.73	14.26
	夏季	503	-0.10	51.90	51.99	5.33	0.668	0.72	14.58
	秋季	603	1.12	43.01	41.90	5.09	0.833	0.83	6.30
	冬季	290	-3.62	26.45	30.07	5.70	0.838	0.82	8.49
拉萨	全年	1654	-6.74	11.98	18.72	19.74	-0.025	-0.07	19.56
	春季	355	-21.05	11.07	32.12	29.04	-0.305	-1.65	50.33
	夏季	472	2.92	17.13	14.22	11.56	-0.125	-0.20	17.65
	秋季	670	-6.35	10.88	17.23	18.91	0.032	0.10	16.10
	冬季	157	-5.01	3.28	8.29	16.44	0.472	2.94	-1.37

0.89 mm (表 2)。四个站点不同季节的平均偏差存在比较大差异,北京站四季平均偏差有一个明显的变化特征: -14.64 mm(春季)、2.67(夏季)、-4.11(秋季)和 -27.11(冬季)。值得注意的是北部站点(北京)夏季平均偏差为正值,其他季节为负值,而南部站点(海口和武汉)则在秋季平均偏差为正值,其他季节为负值。三站均具有夏季 GPS/PW 平均值最大,对应的平均偏差绝对值也最小的特征。以海口站为例,在四个季节中,海口夏季 GPS/PW 平均值最大(51.90 mm),但对应 FY-2/PW 夏季平均偏差绝对值最小(0.1 mm)。海口、北京和武汉三站冬季 GPS/PW 平均值是四个季节中最小值,对应冬季平均偏差绝对值则是四个季节中最大值。

四个站点 GPS/PW 与 FY-2/PW 的全年相关系数分别为 -0.002(北京)、0.691(武汉)、0.892(海

口)和 -0.025(拉萨),可以看出南部站点(海口和武汉)GPS/PW 与 FY-2/PW 相关性明显高于北部站点(北京和拉萨)。北京站夏季相关系数最大(0.815),其他季节相关系数为负值(表 2)。

图 1 为四个站点(北京、武汉、海口和拉萨)GPS/PW 与 FY-2/PW 散点分布及相关结果,不同颜色的散点代表不同季节。北京和武汉站冬季 PW 散点与其他季节明显分布于两个区域,与其他三季相比,冬季 FY-2/PW 数值相对 GPS/PW 明显偏大,两者对应关系一般(图 1a 和 1b)。FY-2/PW 与 GPS/PW 相关性高的海口站则不存在这种现象,海口站四个季节 PW 散点均位于回归线附近。北京站冬季 FY-2/PW 最小值和最大值分别为 1.5 和 71.25 mm, GPS/PW 最小值和最大值则分别为 0.14 和 12.73 mm, 2012 和 2015 年北京站探空计

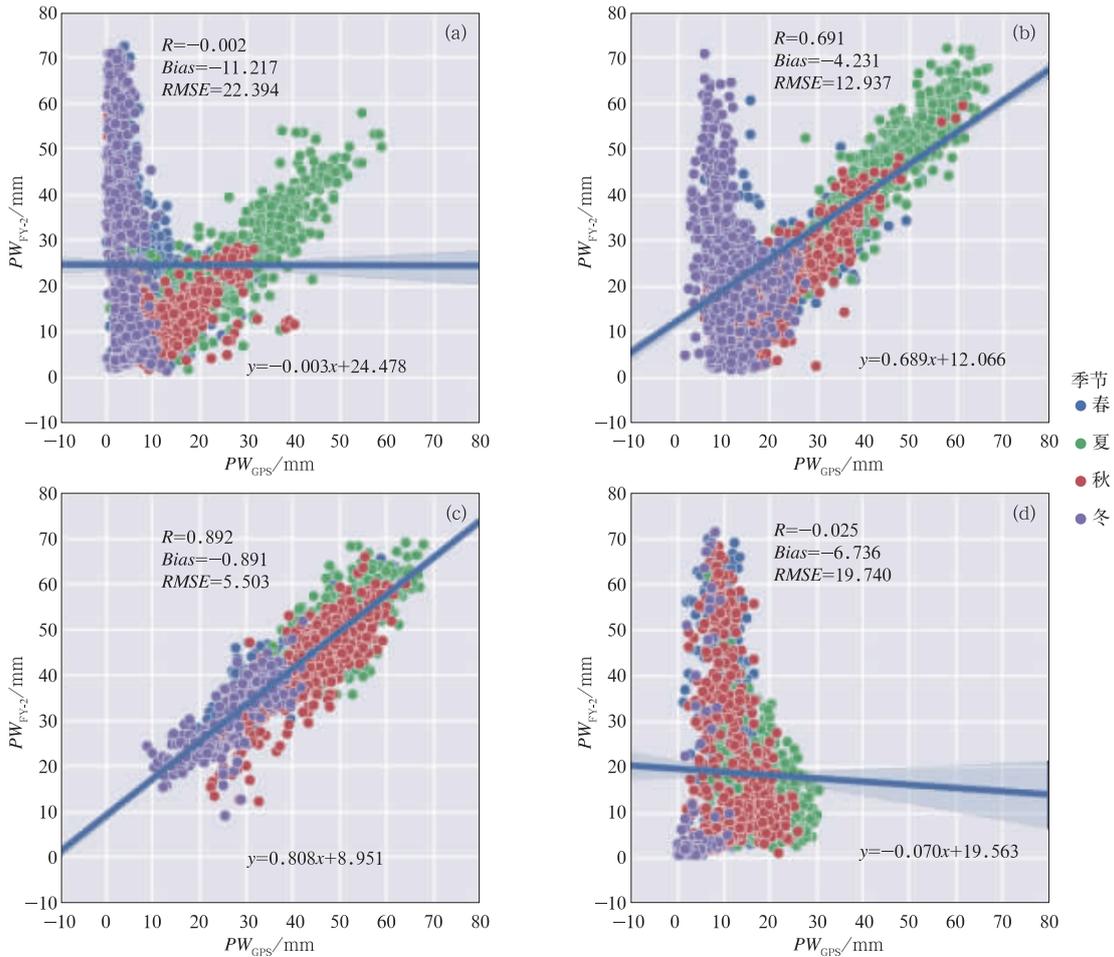


图 1 GPS/PW 与 FY-2/PW 散点分布及相关

(a)北京,(b)武汉,(c)海口,(d)拉萨

Fig. 1 Scatter distribution and correlations of GPS/PW and FY-2/PW

(a) Beijing, (b) Wuhan, (c) Haikou, (d) Lhasa

算的冬季 PW 最大则为 12.32 mm,说明北京站冬季 FY-2/PW 最大值异常偏大。

值得注意的是,北京和武汉站冬季大部分 GPS/PW 观测值小于 20 mm,而海口冬季大部分 GPS/PW 值则大于 20 mm,变化范围为:10~40 mm。拉萨站四季 GPS/PW 平均值均小于 20 mm(表 2),PW 平均偏差分别为 -21.05 mm(春)、2.92 mm(夏)、-6.35 mm(秋)和 -5.01 mm(冬),对应相对偏差分别为 190%、17%、58%和 153%。选择 GPS/PW 大于 20 mm 的 GPS 与 FY-2 数据对进行相关分析显示(图略),北京、武汉、海口和拉萨四站全年相关系数分别为 0.794、0.920、0.872 和 -0.098,数据对总数分别为 592、1027、1567 和 188 对,表明剔除 GPS/PW<20 mm 的数据对后,北京和武汉站 FY-2/PW 与 GPS/PW 均有更强相关性。拉萨站四

季和其他三站冬季 FY-2/PW 最大值异常偏大原因可能与 FY-2/PW 反演算法本身有关,需进一步分析。

2.2 PW/GPS 与 PW/FY-2 的月对比

图 2 和图 3 分别为四个站点 GPS/PW 数据对相关系数与月平均 PW_{GPS} 、平均偏差与均方根误差等统计参量的月变化,其中月平均 PW_{GPS} 是 2012 和 2015 年 PW_{GPS} 的两年平均值。海口站 12 个月月相关系数均大于 0.6,12 月数值最大(0.897),9 月最小(0.616),平均偏差最小的月份是 12 月,最小值为 0.26 mm(图 2c 和图 3c)。

北京和武汉站部分月份相关系数为负值,北京站 6—9 月 GPS/PW 与 FY-2/PW 为正相关,其他月份则为负相关,相关系数变化范围为: -0.71~

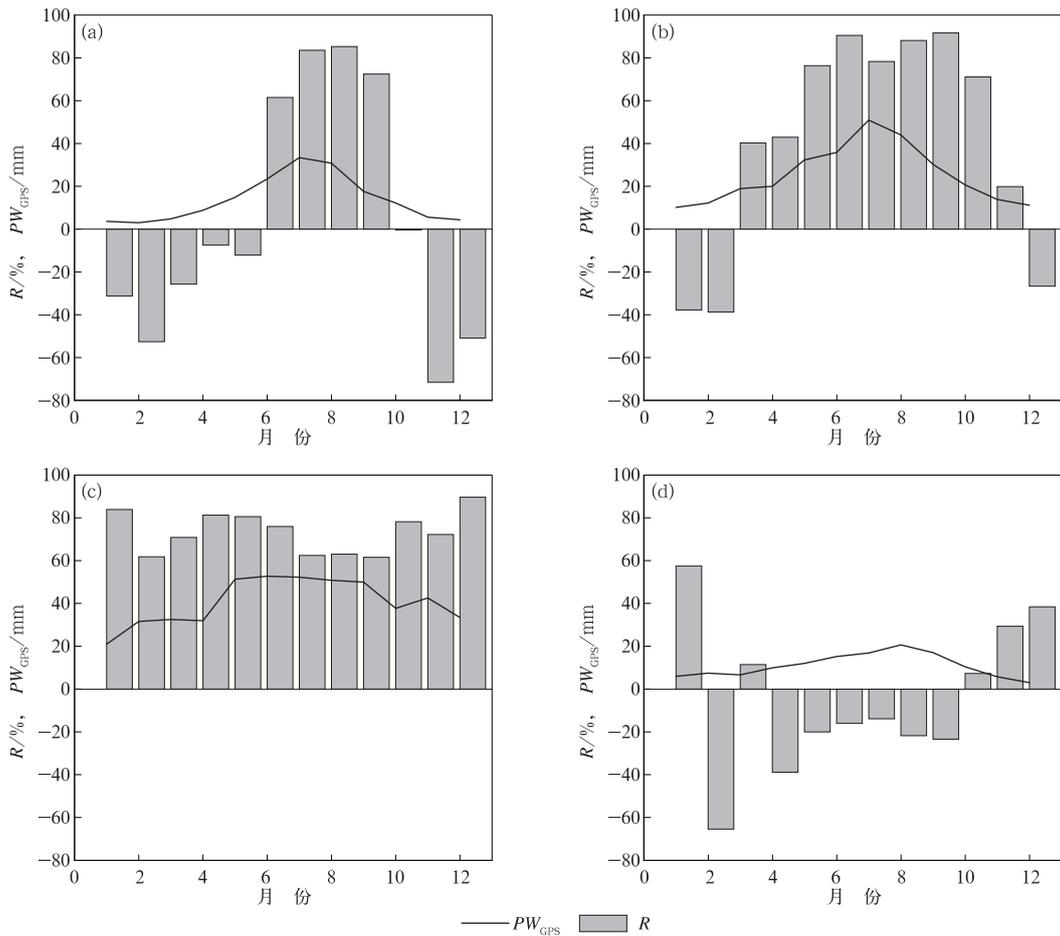


图 2 FY-2/PW 与 GPS/PW 相关系数与月平均 PW_{GPS} 月际变化

(a)北京, (b)武汉, (c)海口, (d)拉萨

Fig. 2 Monthly variation of R and monthly mean PW_{GPS} of GPS/PW and FY-2/PW

(a) Beijing, (b) Wuhan, (c) Haikou, (d) Lhasa

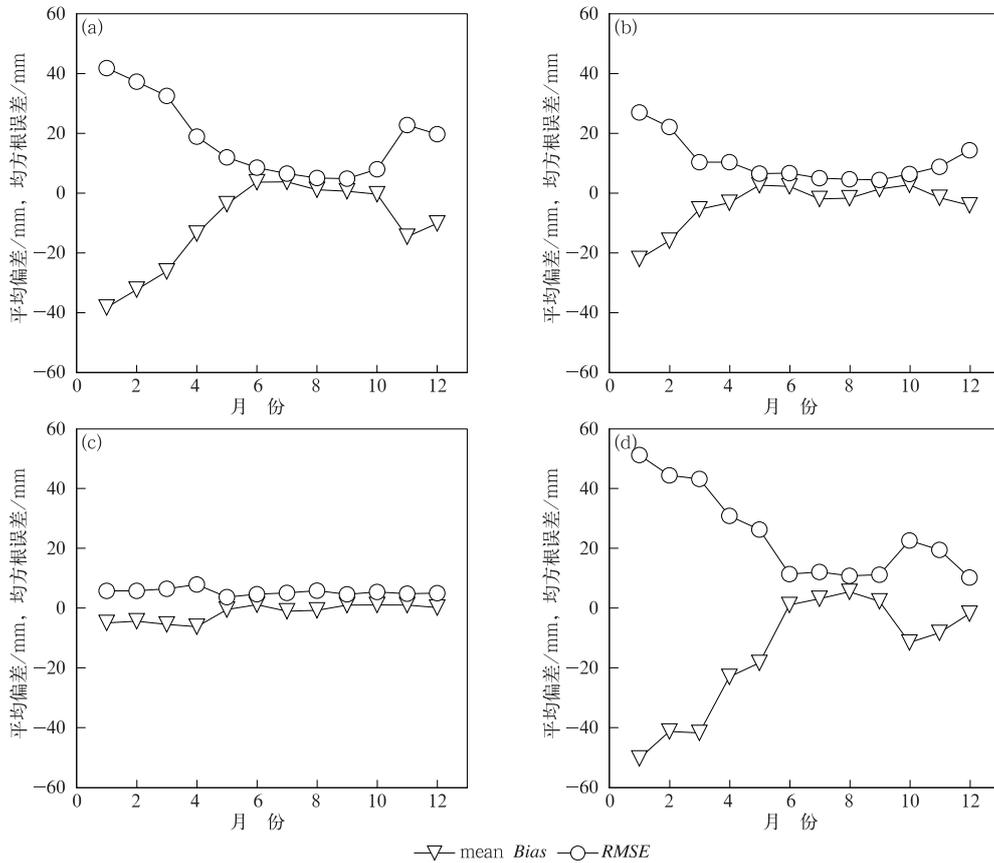


图 3 FY-2/PW 与 GPS/PW 平均偏差和均方根误差月际变化
(a)北京, (b)武汉, (c)海口, (d)拉萨

Fig. 3 Monthly variation of mean bias and RMSE of GPS/PW and FY-2/PW,
(a) Beijing, (b) Wuhan, (c) Haikou, (d) Lhasa

0.853。武汉站冬季月份(12, 1 和 2 月)FY-2/PW 与 GPS/PW 为负相关, 9 月月相关系数最大(0.917)。北京、武汉和海口三站 1—12 月月平均 GPS/PW 最大值均发生于夏季月份, 分别为: 33.41 mm(7 月)、50.93 mm(7 月)、52.76 mm(6 月)。三站月平均 GPS/PW 最小值则均发生于冬季, 其值分别为: 2.98 mm(2 月)、10.16 mm(1 月)、21.01 mm(1 月)。

北京站 RMSE 最小值为 4.86 mm, 发生于夏季(8 月), 冬季月份最大, 最大值为 41.83 mm(1 月), 正相关月份(6—9 月)均方根误差变化范围为 4.86 ~ 8.54 mm, 负相关月份均方根误差变化范围为 8.00 ~ 41.83 mm, 正相关月份均方根误差变化范围明显小于负相关月份(图 3a)。北京站月平均偏差的绝对值最小值为 0.35 mm(10 月), 最大值为 38.25 mm(1 月)。相关系数为正值的月份其月平均偏差同样为正值, 为负值的月份其平均偏差也为

负值(图 2a 和图 3a)。武汉站正相关月份均方根误差均小于 10.4 mm, 相关系数为负值月份均方根误差分别为 14.36 mm(12 月)、27.00 mm(1 月)和 22.15 mm(2 月)。以上分析表明, 北京和武汉站夏季月份 GPS/PW 与 FY-2/PW 一致性好于冬季月份。

从图 2a 和图 3a 中可以看出, 当北京站 GPS/PW 月均值大于 20 mm 时, 平均偏差和均方根误差均较小, GPS/PW 与 FY-2/PW 比较一致; 当 GPS/PW 月均值小于 20 mm 时, 负平均偏差变大, GPS/PW 与 FY-2/PW 差异增大。武汉站同样存在此现象, 如武汉站冬季(12—2 月)GPS/PW 月均值变化范围为: 8.11 ~ 18.42 mm, 对应月份的平均偏差绝对值明显比其他月份大, 2 月月平均偏差绝对值最大, 最大值为 24.58 mm。海口站所有月份 GPS/PW 月均值均大于 20 mm, 大部分月份月平均偏差位于 0 附近, 偏差绝对值小于 8.8 mm, 冬春季月份平均偏差为负值。

拉萨站 12 个月份 GPS/PW 月均值均小于 20 mm, 冬季月份相关系数为正值, 但数值较其他三站偏小, 其他月份相关系数为负值(图 2d)。6—9 月月平均偏差和均方根误差绝对值较小, 其他月份绝对值逐渐增大。

2.3 平均偏差日变化

分别选取 2 年中春季、夏季、秋季和冬季一天 6 个时次 GPS 与 FY-2 的 PW 匹配数据进行对比分析。图 4 和图 5 分别为四个季节北京、武汉、海口和拉萨站 PW 平均偏差 ($PW_{GPS} - PW_{FY-2}$) 和均方根误差的日变化, 时间为世界时。从图 4 中可以看出, 冬季和春季, 四站点大部分时次平均偏差为负值, 说明四站冬季和春季大部分时次 FY-2 反演 PW 值存在高估。

北京站 PW 平均偏差在四个季节均有明显日变化, 夏季与秋季平均偏差日变化相似, 白天(00—

12 时)平均偏差逐渐增加, 夏、秋季分别于 09 和 12 时达到峰值, 夜间(12—21 时)平均偏差逐渐减小, 夏、秋季谷值均发生于 18 时。冬季与春季平均偏差日变化也类似, 平均偏差的峰值均发生于 18 时(北京时 02 时), 分别为 -23.8 和 -6.2 mm。分季节看, 夏、秋季平均偏差日变化比较平缓, 变化范围分别为 1.4~4.7 和 -6.1~-1.4 mm, 冬、春季 PW 平均偏差最大绝对值分别为 30.6 和 17.6 mm。夏季全部时次的平均偏差为正值, 其他三个季节则相反, 为负值, 说明北京站夏季各时次 FY-2 卫星的 PW 反演值存在干偏差, FY-2/PW 存在低估, 相比 GPS/PW, FY-2/PW 在春、秋和冬季所有时次均存在高估。

与北京站类似, 武汉站也存在较明显的日变化, 春、夏和秋季 PW 平均偏差日变化范围为 -4.8~2.3 mm, 冬季平均偏差日变化范围为 -17.1~-12.6 mm(图 4b)。武汉站秋季所有时次 PW 平

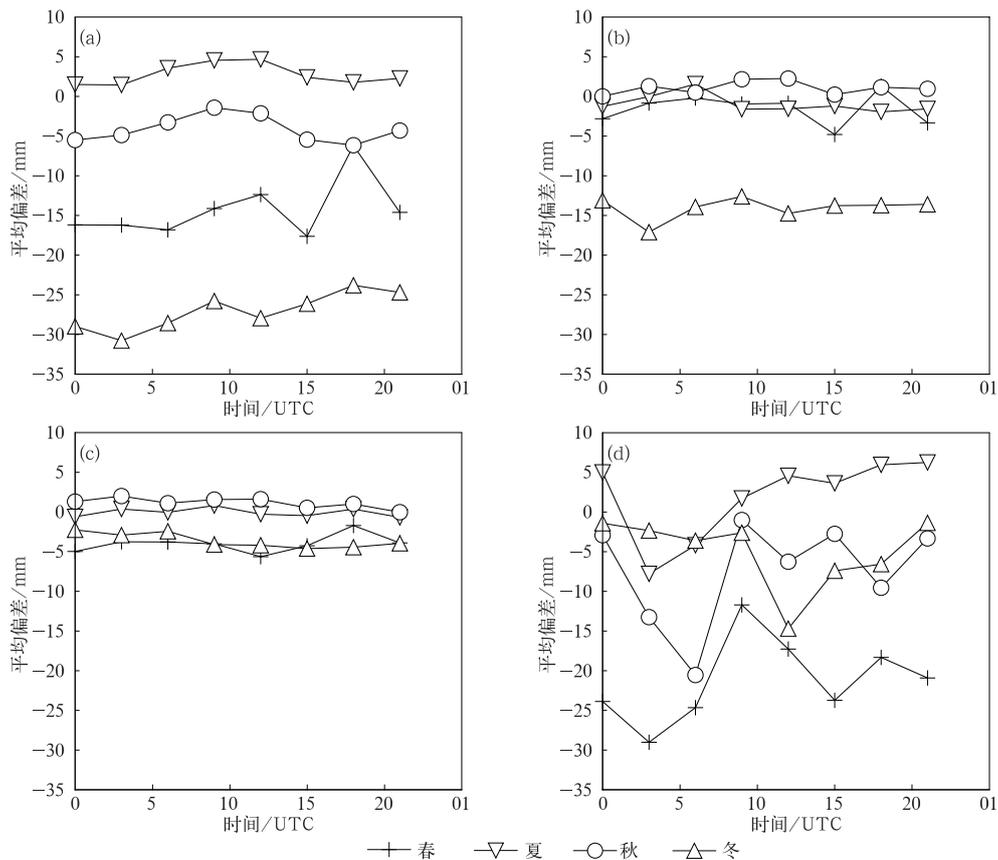


图 4 四站各季节 PW 平均偏差的日变化

(a)北京, (b)武汉, (c)海口, (d)拉萨

Fig. 4 Diurnal variation of Bias ($PW_{GPS} - PW_{FY-2}$) of four seasons

(a) Beijing, (b) Wuhan, (c) Haikou, (d) Lhasa

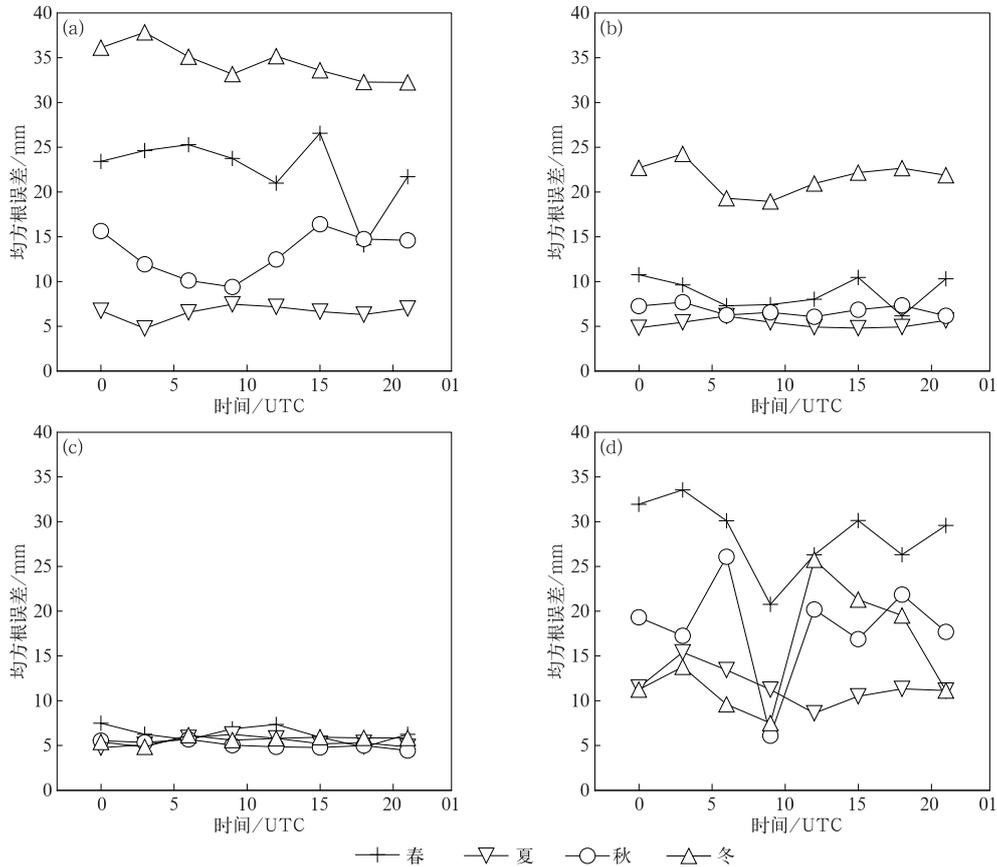


图 5 同图 4, 但为均方根误差

Fig. 5 Same as Fig. 4, but for RMSE

均偏差为正值,春、夏季平均偏差则分别在 18 时(北京时 02 时)和 06 时(北京时 14 时)为正值,其他时次为负值。与北京站相比,武汉站四季各时次平均偏差绝对值明显减小,FY-2/PW 与 GPS/PW 趋于更一致。

与北京和武汉站相比,海口站四季平均偏差各时次差异不大,夏季与秋季平均偏差日变化曲线比较类似,变化范围为 $-0.7 \sim 2.0$ mm(图 4c)。春季平均偏差变化幅度略大,18 时达到峰值(-1.7 mm),12 时达到谷值(-5.6 mm)。海口站春季、夏季和秋季均方根误差没有明显的日变化,大部分时次位于 5 mm 线附近(图 5c);与其他三个季节相比,武汉站冬季各时次均方根误差明显偏大,且有较明显的日变化,09 时达到谷值(18.9 mm),03 和 18 时达到峰值(>22 mm);对于同一时次,北京站冬季均方根误差最大,春季次之,夏季最小。冬、春和秋季均方根误差的日变化也比较明显。

拉萨站冬、春季日变化幅度明显大于夏、秋季,

四季日变化幅度也均明显大于其他三站,说明与其他三站相比拉萨站 FY-2/PW 产品反演质量受日变化影响更明显。四个站点冬季和春季日变化对 FY-2/PW 产品反演质量影响均大于夏季和秋季。

2.4 偏差随 PW 的变化

GPS/PW 与 FY-2/PW 平均偏差(圆点)及均方根误差(竖线)随 GPS/PW 的变化如图 6 所示,平均偏差是依据不同 GPS/PW 区间对偏差值作平均,分区间为 5 mm。总体上看,三站 FY-2 反演大气可降水量平均偏差绝对值都随着 GPS/PW 增大而减小。与月平均偏差逐月变化类似,北京、武汉和海口站 PW 平均偏差也存在 PW 大于 20 mm 区间和小于 20 mm 区间差异明显的现象。当 GPS/PW 大于 20 mm 时,北京、武汉和海口站 PW 偏差均值绝对值分别小于 5.4、2.0 和 4.2 mm,而当 GPS/PW 值从 20 mm 减小,对应湿度较低时,三站 PW 平均偏差均为负值,其绝对值逐渐增大(图 6)。当 GPS/PW 位于最小区间时,北京、武汉和海口三站 PW 偏

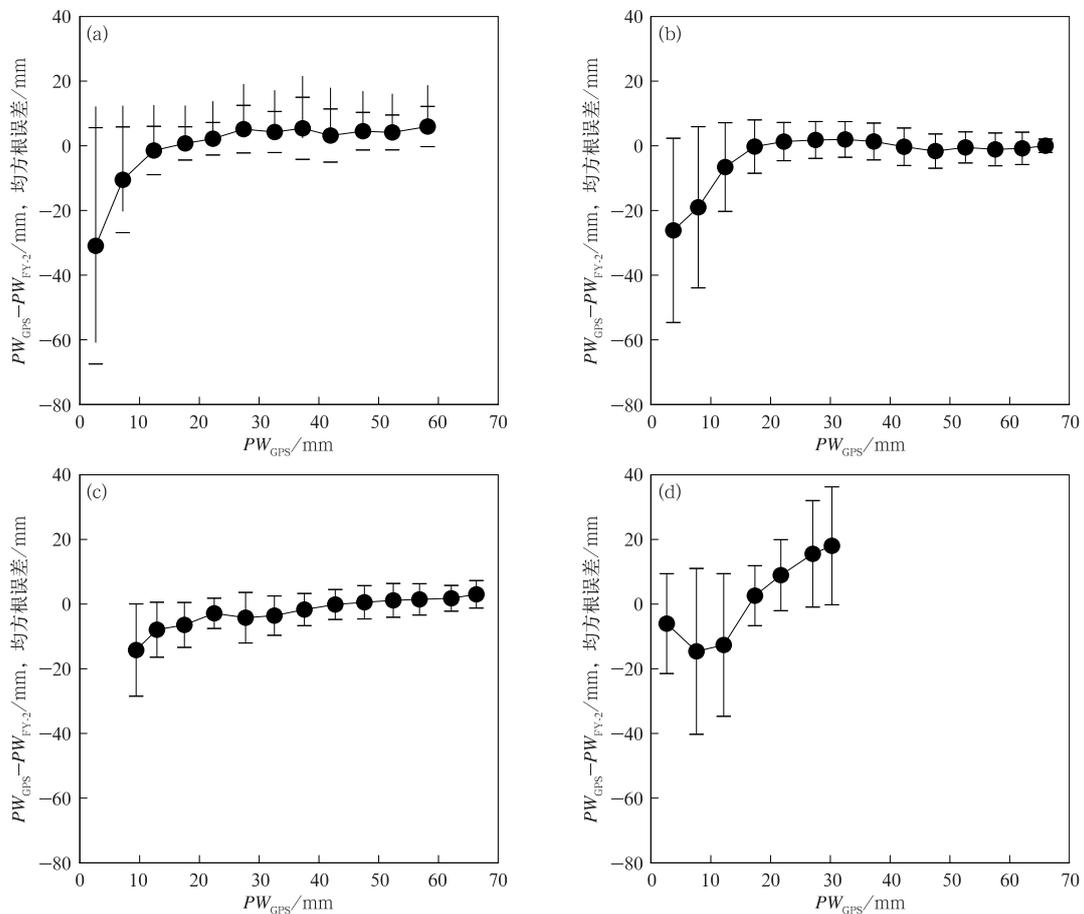


图 6 PW 平均偏差(圆点)及均方根误差(竖线)随 PW_{GPS} 的变化
(a)北京,(b)武汉,(c)海口,(d)拉萨

Fig. 6 Variations of the mean bias ($PW_{GPS} - PW_{FY-2}$, dot) between GPS/PW and FY-2/PW, and RMSE (vertical line) with PW_{GPS}
(a) Beijing, (b) Wuhan, (c) Haikou, (d) Lhasa

差均值的绝对值最大,分别为 30.9、26.14 和 14.2 mm (图 6)。与其他三站不同,拉萨站 GPS/PW 在大于 30 mm 的区间没有数据分布,GPS/PW 在 15~25 mm 区间时,PW 偏差均值绝对值最小,其他区间逐渐增大。以上分析表明,GPS/PW 数值大小对大气可降水量偏差有重要影响。

北京、武汉和海口站 PW 偏差的均方根误差在 GPS/PW 大于 20 mm 区间与小于 20 mm 区间也存在明显差异。总体看,与 GPS/PW 大于 20 mm 区间的均方根误差相比,当 GPS/PW 小于 20 mm 时,三站均方根误差均明显偏大。海口站 GPS/PW 位于大于 20 mm 的区间,均方根误差变化范围为 3.99~7.82 mm,而当 GPS/PW 位于小于 20 mm 的区间时,均方根误差变化范围为 6.94~14.27 mm。当 GPS/PW 分别位于大于和小于 20 mm 的区间

时,对应北京站、武汉站 PW 偏差均方根误差最大值分别为 9.60 和 36.55 mm、5.92 和 28.49 mm。当 GPS/PW 大于 20 mm 时,平均偏差和均方根误差较小。当 GPS/PW 小于 20 mm 时,三站 PW 平均偏差为负值且均方根误差较大,说明 FY-2 卫星反演 PW 结果存在高估,反演精度偏低。

2.5 PW 偏差成因分析

当 GPS/PW 小于 20 mm 时,北京、武汉、海口和拉萨四站 PW 平均偏差均为负值,说明 FY-2 卫星反演 PW 存在湿偏差(图 6),GPS/PW 小于 10 mm 时,北京和武汉站 PW 平均偏差及均方根误差均迅速增大,海口站 GPS/PW 最小值在 10 mm 附近,则没有此现象。利用探空 IGRA/PW 与 FY-2/PW 数据对比分析结果显示,当 IGRA/PW 小于

10 mm 时,北京和武汉站也存在 FY-2/PW 平均偏差及均方根误差均迅速增大现象(图略)。

为进一步分析原因,选取大气湿度非常低, PW 值较小的个例进行分析。图 7 是 2015 年 1 月 3 日 20 时 FY-2E 卫星反演的 PW 空间分布,空白区域无数据(缺测或有云存在),四个站点位置用红圈标注。四站 20 时 GPS/PW 观测值分别为:3.19 mm(北京)、14.74 mm(武汉)、24.53 mm(海口)、4.07 mm(拉萨),四站点探空观测结果为:3.83 mm(北京)、10.19 mm(武汉)、24.23 mm(海口)、2.67 mm(拉萨)。可见冬季北部三站 PW 值均较小。而对应的 FY-2/PW 产品则分别为:41.75 mm(北京)、28 mm(武汉)、31.25 mm(海口)、33.5 mm(拉萨)。20 时北京、武汉和海口站 PW 偏差分别为:−38.56、−13.26、−6.72、−29.43 mm。个例结果也说明 GPS/PW 小于 20 mm,大气湿度偏干时, PW 偏差较大。从图 7 可看出,在北部、西北、青藏高原及云与晴空边界区域,20 时 FY-2/PW 大于 60 mm,存在明显偏差,可能与 FY-2/PW 反演算法本身和云检测结果精度有关。

Suggs et al(1998)指出在大气非常干条件下,分裂窗方法反演 PW 误差很大。来自 12 μm 通道非大气水汽吸收会引起 PW 反演湿偏差(Guillory et al, 1993)。这说明在大气湿度非常低, PW 值较小的条件下,物理分裂窗反演方法本身的局限性是造成 PW 反演误差迅速增大的重要原因。

3 结 论

利用四站(北京、武汉、海口和拉萨)2012和

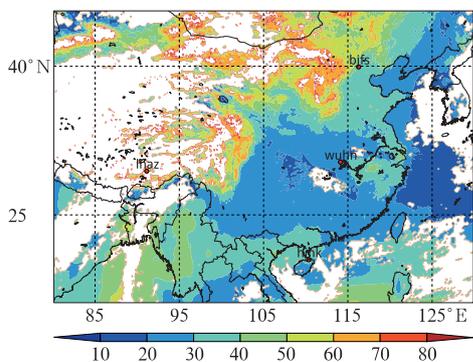


图 7 2015 年 1 月 3 日 20 时
FY-2/PW 空间分布

Fig. 7 Spatial distribution of FY-2/PW
at 20:00 BT 3 January 2015

2015 年 FY-2 卫星资料与地基 GPS 水汽资料,对 FY-2/PW 反演精度及两者差异进行了详细对比分析,并初步分析反演误差成因。得到结论如下:

(1) 北京、武汉和海口三站 PW 日平均偏差和月平均偏差绝对值均存在夏季最小,春秋季节次之,冬季最大的现象。在夏季三站 FY-2/PW 与 GPS/PW 均存在显著正相关,均方根误差均小于冬季, FY-2/PW 反演质量高于冬季。FY-2 卫星反演 PW 产品在夏季和低纬度地区具有较高的可靠性。

(2) 北京与武汉站 PW 平均偏差和均方根误差在四季均有明显日变化,北京站夏、秋季分别于 09 和 12 时达到峰值,夏、秋季谷值均发生于 18 时。夏季全部时次的平均偏差为正值,其他三个季节则相反,为负值。与北京站相比,武汉站四季各时次平均偏差绝对值明显减小, FY-2/PW 与 GPS/PW 趋于更一致;海口站四季平均偏差和均方根误差在各时次差异不大,春、夏和秋三季大部分时次均方根误差位于 5 mm 线附近;拉萨站冬春季日变化幅度明显大于夏、秋季,四季日变化幅度明显大于其他三站。

(3) 当 PW 值大于 20 mm 时,北京、武汉、海口和拉萨站 FY-2/PW 与 GPS/PW 比较一致, PW 偏差均值的绝对值和均方根误差较小;当 PW 值小于 20 mm 时,即湿度较低时, FY-2 卫星反演 PW 的偏差均值绝对值和均方根误差迅速变大,反演精度降低。物理分裂窗反演方法本身局限性是造成 PW 反演误差迅速增大重要原因。GPS/PW 大小对 FY-2/PW 反演精度有重要影响。

参考文献

- 陈丹,周长艳,邓梦雨,等,2016. 西南地区夏季大气水汽含量及其与南亚高压关系[J]. 应用气象学报, 27(4): 473-479.
- 谷晓平,王新明,吴战平,等,2009. 基于 MODIS 近红外数据的贵州高原大气水汽反演研究[J]. 高原气象, 28(2): 446-451.
- 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.
- 李光伟,李春鸾,敖杰,等,2015. 海南岛大气降水量的时空分布特征研究[J]. 自然灾害学报, 24(5): 129-138.
- 李万彪,刘盈辉,朱元竞,等,1998. GMS-5 红外资料反演大气可降水量[J]. 北京大学学报(自然科学版), 34(5): 631-638.
- 梁宏,刘晶森,章建成,等,2006. 青藏高原大气总水汽量的反演研究[J]. 高原气象, 25(6): 1055-1063.
- 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.
- 毛节泰,1993. GPS 的气象应用[J]. 气象科技, 21(4): 45-49.
- 闵文彬,李宾,彭骏,等,2015. 青藏高原东南部及其邻近地区 FY-2E

- 卫星晴空大气可降水量评估[J]. 长江流域资源与环境, 24(4): 625-631.
- 任倩, 周长艳, 何金海, 等, 2017. 前期印度洋海温异常对夏季高原“湿池”水汽含量的影响及其可能原因[J]. 大气科学, 41(3): 648-658.
- 申彦波, 王炳忠, 王香云, 等, 2016. 整层大气水汽含量统计外推方法应用讨论[J]. 高原气象, 35(1): 181-187.
- 师春香, 谢正辉, 2005. 卫星多通道红外信息反演大气可降水业务方法[J]. 红外与毫米波学报, 24(4): 304-308.
- 王继竹, 郭英莲, 徐桂荣, 等, 2014. 湖北省不同资料反演大气降水量的误差分析[J]. 气象, 40(11): 1308-1315.
- 王雨, 张颖, 傅云飞, 等, 2015. 第三代再分析水汽资料的气候态比较[J]. 中国科学: 地球科学, 45(12): 1895-1906.
- 许健民, 张文建, 杨军, 等, 2008. 风云二号卫星业务产品与卫星数据格式实用手册[M]. 北京: 气象出版社: 67-71.
- 杨景梅, 邱金桓, 2002. 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, 26(1): 9-22.
- 郑斯中, 杨德卿, 1962. 中国大陆上空的水汽含量[J]. 地理学报, 28(2): 124-136.
- Bastin S, Champollion C, Bock O, et al, 2005. On the use of GPS tomography to investigate water vapor variability during a Mistral/sea breeze event in southeastern France[J]. Geophys Res Lett, 32(5): L05808. DOI: 10. 1029/2004GL021907.
- 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.
- Divakarla M G, Barnett C D, Goldberg M D, et al, 2006. Validation of Atmospheric Infrared Sounder temperature and water vapor retrievals with matched radiosonde measurements and forecasts [J]. J Geophys Res, 111 (D9): D09S15. DOI: 10. 1029/2005JD006116.
- Durre I, Williams Jr C N, Yin Xungang, et al, 2009. Radiosonde-based trends in precipitable water over the Northern Hemisphere: an update[J]. J Geophys Res, 114(D5): D05112.
- Gao Bocai, Goetz A F, Westwater E R, et al, 1992. Comparison of column water vapor measurements using downward-looking near-infrared and infrared imaging systems and upward-looking microwave radiometers[J]. J Appl Meteor, 31(10): 1193-1201.
- Guillory A R, Jedlovec G J, Fuelberg H E, 1993. A technique for deriving column-integrated water content using VAS split-window data[J]. J Appl Meteor, 32: 1226-1241.
- Jedlovec G J, 1990. Precipitable water estimation from high-resolution split window radiance measurements[J]. J Appl Meteor, 29(9): 863-877.
- King M, Menzel W P, Kaufman Y J, et al, 2003. Cloud and aerosol properties, precipitable water, and profiles of temperature and water vapor from MODIS[J]. IEEE Trans Geosci Remote Sens, 41(2): 442-458.
- Kleespies T J, McMillin L M, 1990. Retrieval of Precipitable Water from observations in the split window over varying surface temperatures[J]. J Appl Meteor, 29(9): 851-862.
- Li Zhenhong, Muller J P, Cross P, 2003. Comparison of precipitable water vapor derived from radiosonde, GPS, and moderate-resolution imaging spectroradiometer measurements [J]. J Geophys Res, 108(D20): 4651.
- 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.
- McMillin L M, Zhao Jiang, Rama V R M K, et al, 2007. Radiosonde humidity corrections and potential Atmospheric Infrared Sounder moisture accuracy[J]. J Geophys Res, 112(D13): D13S90. DOI: 10. 1029/2005JD006109.
- Parkinson C L, 2003. Aqua: An Earth-observing satellite mission to examine water and other climate variables[J]. Geoscience and Remote Sensing, 41: 173-183.
- Prasad A K, Singh R P, 2009. Validation of MODIS Terra, AIRS, NCEP/DOE AMIP-II Reanalysis-2, and AERONET Sun photometer derived integrated precipitable water vapor using ground-based GPS receivers over India[J]. J Geophys Res, 114(D5): D05107. DOI: 10. 1029/2008JD011230.
- Raja M K R V, Gutman S I, Yoe J G, et al, 2008. The validation of AIRS retrievals of integrated precipitable water vapor using measurements from a network of ground-based GPS receivers over the contiguous United States[J]. J Atmos Oceanic Technol, 25(3): 416-428.
- Rocken C, Van Hove T, Ware R, 1997. Near real-time GPS sensing of atmospheric water vapor [J]. Geophys Res Lett, 24(24): 3221-3224.
- Saastamoinen J, 1972. Atmospheric correction for the troposphere and stratosphere in radio ranging satellites[M]// Henriksen S W et al. The Use of Artificial Satellites for Geodesy. Geophys Monogr Ser, 15: 247-251.
- Suggs R J, Jedlovec G J, Guillory A R, 1998. Retrieval of geophysical parameters from GOES: evaluation of a split-window technique [J]. J Appl Meteor, 37(10): 1205-1227.
- Thomas I D, King M A, Clarke P J, et al, 2011. Precipitable water vapor estimates from homogeneously reprocessed GPS data: an intertechnique comparison in Antarctica [J]. J Geophys Res, 116(D4): D04107. DOI: 10. 1029/2010JD013889.