

段晓梅,曹云昌. 2017. 我国 GPS 反演大气可降水量的时空变化[J]. 气象与减灾研究,40(2):111-116.

Duan Xiaomei, Cao Yunchang. 2017. Analysis on spatial and temporal variations of atmospheric precipitable water vapor inverted by GPS[J]. Meteorology and Disaster Reduction Research, 40(2):111-116.

## 我国 GPS 反演大气可降水量的时空变化

段晓梅<sup>1,2</sup>, 曹云昌<sup>2</sup>

1. 成都信息工程大学 电子工程学院, 四川 成都 610225

2. 中国气象局 气象探测中心, 北京 100081

**摘要:** 基于地基 GPS 探测水汽的原理, 利用 2016 年陆态网的站点数据, 对北京十三陵、福建武夷山、内蒙古乌拉特后旗、黑龙江绥阳、新疆若羌和云南东川 6 个站点 GPS 反演大气可降水量(GPS/PWV)的时间变化以及在典型月(1、4、7、10 月)的空间分布变化进行了分析。结果表明:GPS/PWV 具有显著的季节分布规律, 周期性较强, 3—5 月为 GPS/PWV 的快速上升阶段; 6—8 月达到最大, 最大值约 80 mm; 9—11 月为 GPS/PWV 快速下降阶段; 12 月—次年 1 月为全年的最低阶段, 基本在 30 mm 以下。6 个站点 GPS/PWV 的逐小时变化也具有一定的周期性, 最大值出现在 20 时, 最小值出现在 06—08 时。在典型月, 水汽含量的空间分布主要集中在华中、华南、华东地区, 其余地区变化幅度较小, 并且随着纬度的增加而下降, 随着经度的增加而上升。

**关键词:** GPS, 可降水量, 水汽探测, 时空变化

**中图分类号:** P41

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1007-9033(2017)02-0111-06

**doi:** 10.12013/qxyjzjy2017-017

## Analysis on Spatial and Temporal Variations of Atmospheric Precipitable Water Vapor Inversed by GPS

Duan Xiaomei<sup>1,2</sup>, Cao Yunchang<sup>2</sup>

1. College of Electronic Engineering, CUIT, Chengdu 610225, China

2. CMA Meteorological Observation Centre, Beijing 100081, China

**Abstract:** Based on the principle of ground GPS measurements for water vapor, the data from the six stations of terrestrial network, Beijing Ming Dynasty Tombs (BJSH), Fujian Wuyishan (FJWY), Inner Mongolia Wulatehouqi (NMWT), Heilongjiang Suiyang (SUIY), Xinjiang Ruoqiang (XRQ) and Yunnan Dongchuan (YNDC), were used to analyze the spatial and temporal distribution of atmospheric precipitable water vapor (PWV) inverted by GPS in the typical months in 2016. The results showed that the PWV presented an obvious seasonal distribution, which increased rapidly from March to May, and reached the maximum value of 80 mm during June and August; while it decreased during September and November, with the minimum value of 30 mm in winter. The daily variations of the six sites exhibited a certain cycle, the maximum and minimum values appeared at about 20:00 pm and 08:00 am, respectively. The water vapor was mainly concentrated in central China, southern China and eastern China in the typical months, and small variations were recorded in the rest of the region. Moreover, PWV decreased with the increase of latitude and decrease of longitude in typical months.

**Key words:** GPS; precipitable water vapor; water vapor detection; temporal and spatial variation

## 0 引言

通过使用安置在地面的 GPS 接收机,测量 GPS 卫星信号纵向穿过大气层到达地面时所引起的时间延迟量,从而反演出天顶方向上整层大气层或信号斜路径上水汽的积累量,称为地基 GPS 气象学。GPS 监测水汽具备高精度、高时空分辨率、不受各种天气条件限制且经济成本低等优势(李国平,2011),在气象研究领域得到了快速的发展,从而弥补了传统水汽观测手段的不足(王海深等,2015)。在空间大地测量学、天气学、大气环境科学等范畴领域中,水汽扮演着非常重要的角色,它是气象上非常重要的一个参数,也是大气中时空变化最活跃的成分之一。而生成云和降水必须要有充足的水汽(廖敏等,2012),这对天气和气候变化有着显著的影响。由于水汽的相变会产生很高的相变潜热,会对风暴系统的结构、大气的垂直稳定度以及地气系统的辐射平衡产生显著的影响。同时,水汽在大气中分布极不均匀,水汽的局地集中,可造成恶劣天气。所以,如何准确地监测大气中的水汽含量、分布以及变化趋势是预测全球水汽变化、中小尺度灾害性天气以及气候变化的一个重要参考因子。使用地基 GPS 探测资料反演水汽一直是气象学的研究热点(杨磊等,2016)。Dixon(1990)等最早提出了利用 GPS 进行地基大气遥感的方法。Bevis 等(1994)进行了一系列的试验,结果表明,在地面设置固定的 GPS 网站能连续的监测站点上空中整层大气的水汽量,其精度可达毫米级,时间分辨率小于 1 h,并且不受大气中云的影响。国内对于地基 GPS 气象学的研究从 20 世纪 90 年代中期开始(曹云昌等,2006),由国家卫星气象中心和北京大学共同对大气水汽总量进行了反演分析。曹云昌等(2005)指出降水大多数出现在 PWV 快速上升的 3—4 h,其降水强度与 PWV 的增量有关。张恩红等(2015)利用 GPS 数据分析了北京地区暴雨水汽特征,并与探空和 FY-2D 卫星对比,证明 GPS/PWV 具有很好的稳定性。周顺武等(2016)基于 JICA 项目分析了西藏地区改则站 GPS/PWV 的变化特征,表明 PWV 上升和下降与强降水有很好的对应关系。张华龙等(2016)指出 PWV 的空间分布变化对单体及多单体雷暴的发生和发展有很好的指示作用。

文中利用 2016 年中国大陆构造环境监测网络的站点数据,基于 GPS 卫星探测大气降水量的原理,选取北京十三陵(BJSH)、福建武夷山(FJWY)、

内蒙古乌拉特后旗(NMWT)、黑龙江绥阳(SUIY)、新疆若羌(XJRQ)和云南东川(YNDC)6 个站点为研究对象,对其年、月、日变化以及在典型月(1、4、7、10 月)全国平均 GPS/PWV 的空间分布进行分析,为我国水汽分布特征和变化情况提供参考。

## 1 地基 GPS 反演大气降水量的原理

GPS 卫星在定位中发射的信号在穿过大气层时,受到电离层电子、平流层和对流层大气折射等作用,使得信号的传递速度变慢和路径弯曲,从而形成信号在时间上的延迟,引起 GPS 定位误差。这种延迟往往可以分为对流层延迟(ZTD)和电离层延迟。按照电离层延迟与频率的相关性,使用 2 个频率观测值的线性组合消除(韦丽英和赵建吉,2006),精度可达毫米级。而对流层延迟的 90%是由大气中干空气产生的,称为干延迟或者静力延迟(ZHD);剩余的 10%是由水汽的湿延迟(ZWD)引起的;则大气静力延迟和湿延迟共同组成对流层总延迟(付琦琼等,2011)。

Elgered 等(1991)在假设流体力学平衡、理想气体的条件下,得到 ZHD 表达式:

$$ZHD = (0.002279 \pm 0.0000024) \frac{P_0}{f(\varphi, H)} \quad (1)$$

$$f(\varphi, H) = 1 - 0.00266 \cos 2\varphi - 0.00028H \quad (2)$$

式中, $P_0$  为 GPS 接收机高度处的气压,单位: hPa;  $\varphi$  为测站纬度;  $H$  为观测站点的海拔高度,单位: km。上式对 ZHD 的估算精度可达 1 mm。将测量得到的 ZTD 减去 ZHD,就可以得到天顶湿延迟(ZWD),其数值大约为 0—500 mm。地基 GPS 遥感水汽的大气可降水量计算式:

$$PWV = \Pi \cdot ZWD \quad (3)$$

$$\Pi = \frac{10^6}{R_v \left( \frac{k_3}{T_m} + k'_2 \right)} \quad (4)$$

式中, $T_m$  称作加权平均温度,单位: K;  $T_m = a + b \cdot T_s$ ,  $T_s$  为地面温度,单位: K。Bevis 等(1992)给出经验系数  $a = 70.2$ ,  $b = 0.72$ ; 李建国等(1999)利用中国的探空资料,给出了北京地区的回归系数  $a = 44.05$ ,  $b = 0.81$ 。水汽的比气体常数  $R_v = 461.495 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ;  $k_3$ 、 $k'_2$  为折射系数,一般采用 Thayer(1974)提供的值:  $k_3 = (3.776 \pm 0.014) \times 10^5 \text{ K}^2/\text{hPa}$ ,  $k'_2 = k_2 - k_1(R_d/R_w) = 16.48 \text{ K}/\text{hPa}$ 。

## 2 资料说明

利用来自中国大陆构造环境监测网络(<http://>

www.neiscn.org/)的站点数据,选取北京十三陵(BJSH)、福建武夷山(FJWY)、内蒙古乌拉特后旗(NMWT)、黑龙江绥阳(SUIY)、新疆若羌(XJRQ)和云南东川(YNDC)6个站点为研究对象,站点分布如图1所示。接收机类型为TRIMBLE NETR8,天线类型为TRM 59800。数据为2016年1月1日01:00—12月31日23:00(UTC,下同)每天逐小时连续观测的数据。

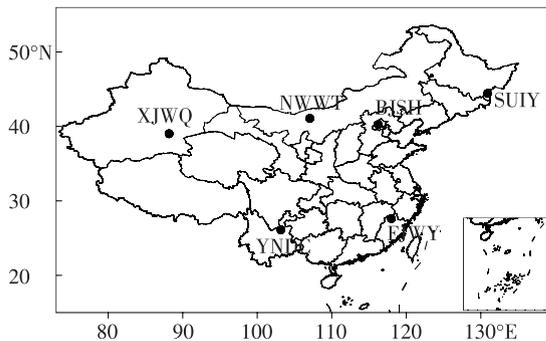


图1 6个观测站点分布

Fig. 1 Geographic distribution of 6 observation sites

### 3 GPS/PWV 时空变化分析

#### 3.1 年变化

图2给出了2016年6个站点GPS/PWV随时间的变化。分析可知,各站GPS/PWV分布整体呈先增加后减小,分布较为均匀,没有显著的增加或减小的趋势。FJWY站和YNDC站的GPS/PWV值明显大于BJSH站和NMWT站,最小差值为10 mm,最大差值达到20 mm,而SUIY站和XJRQ站的GPS/PWV值相近。在夏季(6—8月)SUIY站的GPS/PWV值要大于XJRQ站,主要是因为XJRQ站位于我国西部地区,地处塔克拉玛干沙漠东南缘,夏季温度较高,周围植被覆盖又少,通过蒸发作用进入空气中的水汽就格外稀少,同时其地理位置相对于SUIY站离海较远,来自海洋的湿润空气又不易到达,所以其GPS/PWV含量低于SUIY站。由此可见,东西部地区的水汽含量差异较小,为5—10 mm,而南北地区水汽含量差异较大,为10—20 mm。

#### 3.2 月变化

为了更细致地分析GPS/PWV的四季变化,图3给出了6个站点GPS/PWV月平均值的变化。分析可知,FJWY站和YNDC站在6、7、8月是由梅雨进入盛夏的季节,GPS/PWV迅速上升,并在6月大

气中的平均水汽含量达到极大值。FJWY站GPS/PWV最大值出现在7月,为55.43 mm,YNDC站最大值出现在6月,为45.07 mm。这是由于季风地区受夏季风影响的结果,夏季温度较高,大气的蓄水能力较强,同时夏季风从海洋吹向陆地,盛行偏南风,给大陆带来大量的水汽,造成水汽不断增加(罗梦森等,2013)。BJSH站和SUIY站位于长江以北地区,气候相对干燥,水汽含量明显减弱,最大值分别为42.65和33.51 mm。而NMWT站和XJRQ站深处内陆,受夏季风影响较小,水汽含量也相对较低,夏季水汽含量最大值分别为29.79和34.76 mm。在9—11月,6个站点的GPS/PWV开始逐渐下降,这是由于进入秋季后,大气温度降低导致水汽含量也随之降低。12月一次年1月达到全年最低,随后从3月开始缓慢上升。可见,一年内GPS/PWV的月平均值存在明显的季节变化规律,即3—5月为GPS/PWV的快速上升阶段,6—8月GPS/PWV达到最大值,9—11月为快速下降阶段,12月一次年1月为全年的最低阶段。

#### 3.3 日变化

为了进一步解析GPS/PWV在更小时间尺度上的变化规律,即逐小时变化特征,文中对GPS/PWV时间序列计算其逐日值,目的是为了消除其他时间尺度的周期变化,再对不同月份的GPS/PWV值按逐小时进行统计,得到了2016年6个站点在1、4、7、10月GPS/PWV的逐小时变化(图4)。

分析图4可以看出,总体上在一天当中水汽含量的最大值出现在20时左右,白天由于受太阳辐射的影响,温度高于夜间,随着温度的升高大气中的分子活动越剧烈,水汽不断蒸发,大气容纳水汽的能力增强,导致水汽含量在白天持续积累,在20时达到极大值。GPS/PWV最小值出现在06—08时,这是因为夜间温度不断下降,水汽含量也随之下降。在典型月份,XJRQ站的GPS/PWV随时间变化浮动非常小,小于0.5 mm。YNDC站在春季(4月)、夏季(7月)其GPS/PWV随时间变化浮动较大,约为5 mm。春季(4月)各站点具有明显的周期变化规律,极小值出现在08时,极大值出现在20时。进入秋季(10月)后,BJSH站GPS/PWV波动较大,约为3 mm,各站点的极大值仍然出现在19—20时,极小值出现在06—08时。冬季(1月)各站的PWV异常值随时间变化较为平稳。

#### 3.4 空间分布变化

图5给出了2016年1、4、7、10月这4个典型月

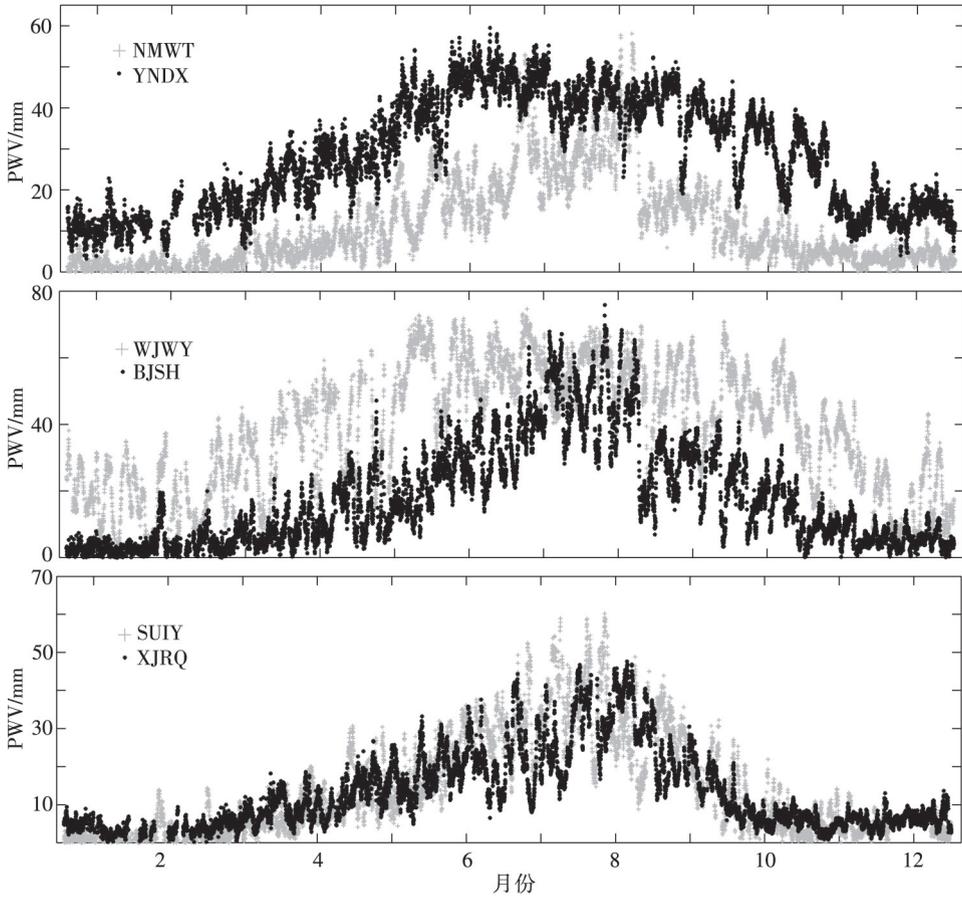


图2 2016年6个站点GPS/PWV随时间的变化

Fig. 2 Monthly variations of PWV from the six stations in 2016

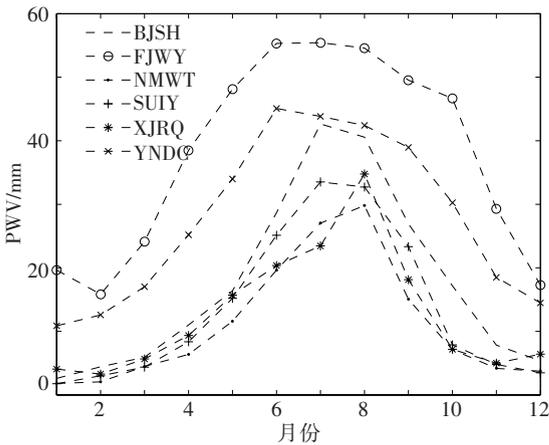


图3 2016年各站GPS/PWV月平均值的变化

Fig. 3 Variations of the monthly mean GPS/PWV for each station in 2016

的全国平均GPS/PWV的空间分布。分析可知,1、4、7、10月的全国平均GPS/PWV逐渐增加,尤其是在华中、华东、华南地区增加较为明显。1月全国平均GPS/PWV最低,只有海南地区达到32 mm,最

低平均值为0.6 mm。4月是全国平均GPS/PWV的上升阶段,华南地区水汽含量明显增加,最大平均值达到70.63 mm。7月全国平均GPS/PWV持续上升,一直扩展到华北东部和东北地区,最大平均值可以达到80 mm,最小值平均值只有9.2 mm。到10月全国平均GPS/PWV开始降低,但是在华南地区,尤其是在福建、台湾、海南等地区仍有52 mm,降低的幅度较小,最大平均值达到57.9 mm,最小平均值为1.54 mm。而在西部、西北部、华北北部等地区典型月GPS/PWV普遍小于20 mm,最低平均值小于10 mm。这是由于西北部地区离海较远,且纬度较高,GPS/PWV含量相对于东南地区明显减少;而东部地区离海较近且纬度较低,水汽含量大于西部地区。可见,水汽含量主要集中在华中、华南、华东地区,并且随着纬度的增加而下降,随着经度的增加而上升。

#### 4 结论

利用2016年中国大陆构造环境监测网络的站

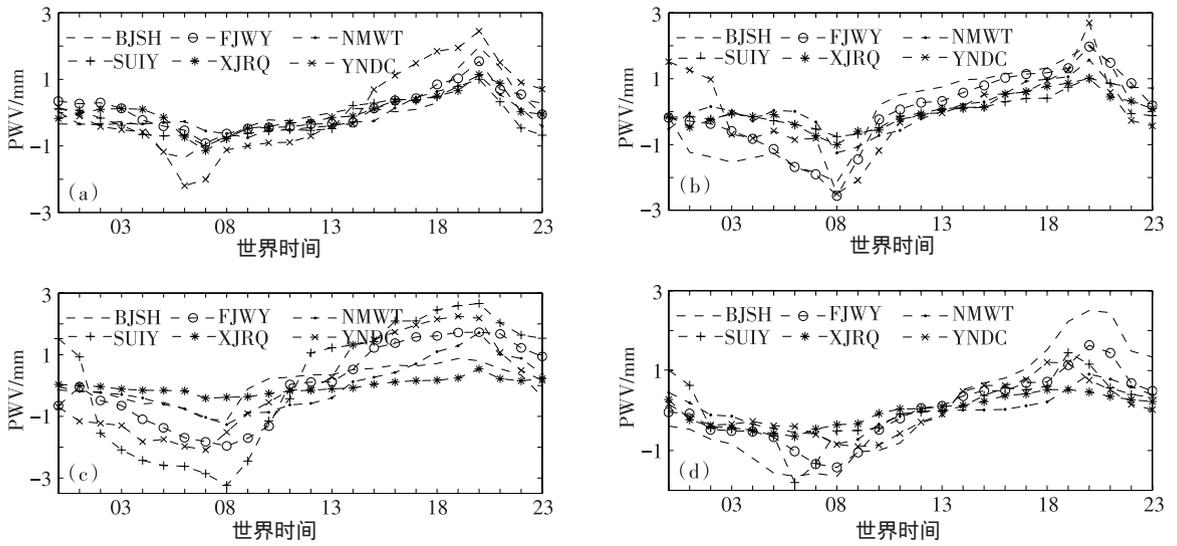


图 4 2016 年 1 月(a)、4 月(b)、7 月(c)、10 月(d)各站 GPS/PWV 的逐小时变化

Fig. 4 Daily variations of PWV for each station in January (a), April (b), July (b) and October (d)

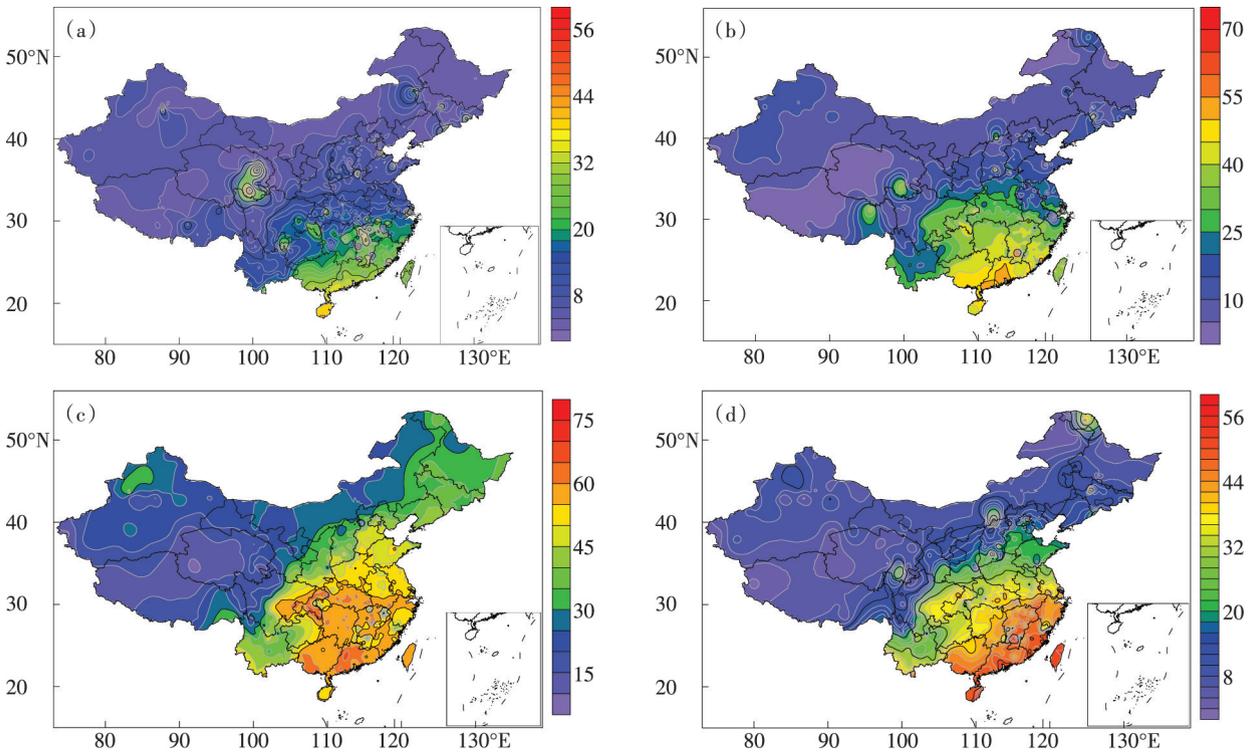


图 5 2016 年 1 月(a)、4 月(b)、7 月(c)、10 月(d)全国平均 GPS/PWV 分布(单位:mm)

Fig. 5 Spatial distribution of the nationwide mean PWV (units:mm) in January (a), April (b), July (c) and October (d), 2016

点数据,基于 GPS 卫星探测大气可降水量的原理,选取北京十三陵、福建武夷山、内蒙古乌拉特后旗、黑龙江绥阳、新疆若羌和云南东川 6 个站点为研究对象,对 GPS/PWV 年、月、日变化以及在典型月(1、4、7、10 月)的空间分布进行了分析,得出:

1) GPS/PWV 年变化很好地反映了我国全年水汽含量的变化,南北地区水汽含量差异较大,为 10—20 mm,而东西部地区水汽含量差异较小,为 5—10 mm。

2) GPS/PWV 具有显著的季节变化规律,其周

期性较强,3—5月为快速上升阶段,6—8月达到最大,最大值约为80 mm,9—11月为快速下降阶段,12月—次年1月为全年的最低阶段,最小值约为1.76 mm。

3) 各站点在不同月份其GPS/PWV波动幅度不尽相同,但是在一天当中变化具有一定的周期性,最大值出现在20时,最小值出现在06—08时。

4) GPS/PWV的空间分布也能很好地看出全国水汽含量的差异,在典型月水汽含量主要集中在华中、华南、华东等地区,其余地区变化幅度较小。GPS/PWV最大平均值出现在7月,为80 mm,最小平均值出现在1月,为0.6 mm,并且随着纬度的增加而下降,随着经度的增加而上升。

由于在解算GPS/PWV过程中存在多种影响因素,导致很多时刻的PWV值缺测,对结果造成一定误差,需要进一步改进、优化系统的解算结果。

## 参考文献(References)

Bevis M, Businger S, Chiswell S R, et al. 1994. GPS meteorology: Mapping zenith wet delays onto precipitable water[J]. *J Appl Meteor*, 33:379-386.

Bevis M, Businger S, Herring T A, et al. 1992. GPS meteorology: Remote sensing of atmospheric water vapor using the global positioning system[J]. *J Geophys Res*, 97(D14):15787-15801.

曹云昌,方宗义,夏青. 2005. GPS遥感的大气水汽总量与局地降水关系的初步分析[J]. *应用气象学报*, 16(1):54-59. Cao Y C, Fang Z Y, Xia Q. 2005. A preliminary analysis of the relationship between the total amount of atmospheric water vapor and local precipitation observed by GPS[J]. *J Appl Meteor Sci*, 16(1):54-59.(in Chinese)

曹云昌,方宗义,夏青. 2006. 中国地基GPS气象应用站网建设展望[J]. *气象*, 32(11):42-47. Cao Y C, Fang Z Y, Xia Q. 2006b. Prospect of meteorological application network on the ground-based GPS in China[J]. *Meteor Mon*, 32(11):42-47.(in Chinese)

Dixon T. 1991. An introduction to the global positioning system and some geological applications[J]. *Rev Geophys*, 35:830-838.

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]. *Res Geophys*, 96(B4):6541-6555.

付琦琼,李巾,张瑛. 2011. GPS水汽资料在江西强对流天气预报中的初步应用[J]. *气象与减灾研究*, 34(3):36-40. Fu Q Q, Li J, Zhang Y. 2011. Preliminary application of GPS/MET data on the severe convective weather process in Jiangxi[J]. *Meteor Disaster Reduction Res*, 34(3):36-40. (in Chinese)

廖敏,邹海波,单九生,等. 2012. 地基GPS水汽资料在江西一次暴雨过程的应用分析[J]. *气象与减灾研究*, 35(3):33-38. Liao M, Zou H, Shan J S, et al. 2012. Application analysis of ground-based GPS PWV data on a heavy rainfall event in Jiangxi[J]. *Meteor Disaster Reduction Res*, 35(3):33-38.(in Chinese)

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 J G, Mao J T, Li C C, et al. 1999. The approach to remote sensing of water vapor based on GPS and linear regression  $T_m$  in eastern region of China[J]. *Acta Meteor Sinica*, 57(3):283-292.(in Chinese)

罗梦森,曾明剑,景元书,等. 2013. GPS反演的大气可降水量变化特征及其与降水的关系研究[J]. *气象科技*, 33(04):418-422. Luo M S, Zeng M J, Jing Y S, et al. 2013. Change characteristics of GPS PWV and its relationship with precipitation[J]. *Meteor Sci Technol*, 33(4):418-422.(in Chinese)

Thayer G. 1974. An improved equation for the radio refractive index of air[J]. *Radio Aci*, 9:803-807.

王海深,曹云昌,梁宏. 2015. 利用北斗卫星进行水汽探测分析[J]. *数字通信世界*, 11(s1):13-16. Wang H S, Cao Y C, Liang Hong. 2015. Analysis on water vapor detection by Beidou satellite[J]. *Digital communication world*, 11(s1):13-16. (in Chinese)

韦丽英,赵建吉. 2006. GPS测量水汽简介及建站要求[J]. *广西气象*, 27(3):73-74. Wei L Y, Zhao J J. 2006. Brief introduction for the GPS measurement of water vapor and station construction request[J]. *Guangdong Meteor*, 27(3):73-74.(in Chinese)

杨磊,蒋大凯,王瀛,等. 2016. 辽宁省汛期GPS大气降水量的特征分析[J]. *干旱气象*, 34(1):82-87. Yang L, Jiang D K, Wang Y, et al. 2016. Analysis of atmospheric precipitable water vapor characteristics during flood season in Liaoning province based on GPS remote sensing data[J]. *Arid Meteor*, 34(1):82-87.(in Chinese)

张恩红,曹云昌,王晓英. 2015. 利用地基GPS数据分析北京“7.21”暴雨水汽特征[J]. *气象科技*, 43(6):1157-1163. Zhang E H, Cao Y C, Wang X Y. 2016. Characteristics of water vapor in a heavy rainstorm based on ground-based GPS measurements in Beijing[J]. *Meteor Sci Technol*, 43(6):1157-1163.(in Chinese)

张华龙,张恩红,胡东明,等. 2016. GPS可降水量在华南强对流过程的应用效果[J]. *广东气象*, 38(3):6-11. Zhang H L, Zhang E H, Hu D M, et al. 2016. Application of GPS precipitable water vapor in severe convection in southern China[J]. *Guangdong Meteor*, 38(3):6-11.(in Chinese)

周顺武,王烁,马思琪,等. 2016. 地基GPS遥感西藏改则站大气可降水量变化特征及其与夏季降水的关系[J]. *气象科技*, 36(3):403-410. Zhou S W, Wang S, Ma S Q, et al. 2016. Variation characteristics of GPS-retrieved atmospheric precipitable water vapor and its relation with summer precipitation at Gaize station[J]. *Meteor Sci Technol*, 36(3):403-410.(in Chinese)