

# 基于单站 CORS 的台风麦德姆造成的降水量分析

刘智敏<sup>1,2</sup>, 窦世标<sup>2</sup>, 黄超<sup>2</sup>, 张海平<sup>3</sup>, 冯彦同<sup>3</sup>

(1. 山东科技大学 山东省高校海洋测绘重点实验室, 山东 青岛 266590;

2. 山东科技大学 测绘科学与工程学院, 山东 青岛 266590; 3. 山东省国土测绘院, 山东 济南 250102)

**摘要:**对 2014 年 7 月台风麦德姆(Matmo)影响青岛市并造成的一次暴雨发生过程的单站 CORS 观测数据处理以获取对流层延迟量,利用对流层延迟中的湿延迟量计算大气可降水量(PWV),将其变化与实际降水的发生时间和降水量进行对比分析,得到了 PWV 变化与降水发生过程之间的关系,即在暴雨发生前 3~6 h PWV 会有明显下降,进一步得出单站 CORS 获取的 PWV 值能够用于暴雨等强降水预报。

**关键词:**对流层延迟;大气可降水量;单连续运行参考站;暴雨分析

中图分类号:P458.3

文献标志码:A

文章编号:1672-3767(2015)05-0056-05

## Precipitation Caused by Typhoon Matmo Based on Single-Station CORS

Liu Zhimin<sup>1,2</sup>, Dou Shibiao<sup>2</sup>, Huang Chao<sup>2</sup>, Zhang Haiping<sup>3</sup>, Feng Yantong<sup>3</sup>

(1. Key Laboratory of Marine Surveying and Mapping in Universities of Shandong, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China;

2. College of Geomatics, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China;

3. Shandong Provincial Institute of Land Surveying and Mapping, Jinan, Shandong 250102, China)

**Abstract:** Focusing on the torrential rain in Qingdao caused by Typhoon Matmo in July 2014, this paper processed the observation data of single station CORS to acquire troposphere delay and PWV (precipitable water vapor) was calculated by using the troposphere wet delay. Then the changes of PWV were compared with the time and amount of real precipitation and the relationship between changes of PWV and the process of precipitation. That is, PWV will decrease obviously in 3~6 hours before the rainstorm. Thus, it is concluded that the PWV value obtained from the single station CORS can be used for the prediction of heavy precipitation such as torrential rain.

**Key words:** troposphere delay; precipitable water vapor; single-station continuous operational reference system; analysis of torrential rain

地基全球定位系统(global positioning system, GPS)技术是对目前常规大气探测手段的补充,可作为大气探测方法之一<sup>[1]</sup>。地基 GPS 技术在大气方面的研究中,Bevis 等首先提出利用其计算水汽含量的原理<sup>[2]</sup>。Rocken 等提出计算相对大气可降水量(precipitable water vapor, PWV)的方法,且对 GPS 网内水汽辐射计的使用进行了研究,提出引入远距离 GPS 站省去水汽辐射计的方法<sup>[3]</sup>。

国内学者对地基 GPS 技术在水汽监测<sup>[4]</sup>、斜路径水汽含量的计算<sup>[5-7]</sup>以及暴雨等灾害性天气预报方面<sup>[8-10]</sup>进行了研究。在暴雨发生前一段时间(24 h 以上)PWV 值会维持较长时间的稳定,在暴雨发生前后 PWV 值会有上升和下降的情况出现;通过对 GPS/PWV 数据的多年研究得到降水发生时的 PWV 阈值,风险评估(threat score, TS)值经过多年实际检验达到 0.7 以上;对中小尺度的降水监测可使用 GPS/PWV 和

收稿日期:2015-07-01

基金项目:国家自然科学基金项目(41374009);山东省高校海洋测绘重点实验室开放基金项目(2013B04)

作者简介:刘智敏(1975—),女,河北唐山人,副教授,博士,主要从事 GNSS 理论与数据处理研究。E-mail:liuzhimin010@163.com

卫星云图资料, 得出了强降水发生的条件是大气可降水量和云的高位稳定和维持; 对不同的强对流天气系统下 GPS/PWV 的研究发现, PWV 值的变化与降水有着较好的对应关系。

随着连续运行卫星定位服务综合系统(continuous operational reference system, CORS)的建成, 区域 CORS 数据处理的及时性、可靠性和有效性成为地基 GPS 的重要数据源。本研究针对青岛市受台风麦德姆影响形成暴雨的过程, 基于单站 CORS 数据获取 PWV 值, 分别对降水前 24, 12, 6, 3 h 的 PWV 值进行分析, 结合实际降水发生时间和降水量, 得出 PWV 值的变化对降水发生的预报作用。

### 1 单站 CORS 反演 PWV 原理

将电磁波与大气相互作用产生的信号总延迟减去电离层延迟得到对流层延迟。将对流层延迟中的静力学延迟(天顶干延迟)扣除得到与大气中水汽含量直接相关的天顶湿延迟, PWV 通过对流层延迟中的湿延迟量求取。

GPS 数据处理中双差技术可以不受卫星钟差的影响, 接收机的钟差同样可以消除, 减少了待求参数。考虑到基于载波相位的非差精密单点定位(precise point positioning, PPP)的优点<sup>[11]</sup>, 本研究采用高精度 GPS 数据处理软件 Bernese 的精密单点定位模块处理单站 CORS 数据。天顶总延迟(zenith total delay, ZTD)记为  $\Delta L_{ztd}$ , 通过观测站的气象元素和干延迟分量模型计算得到的天顶干延迟分量(zenith hydrostatic delay, ZHD)记为  $\Delta L_{zhd}$ , 电离层延迟量(ionosphere delay)记为  $\Delta L_{ion}$ 。由式(1)得到的天顶湿延迟分量记为  $\Delta L_{zwd}$ (zenith wet delay, ZWD), 即:

$$\Delta L_{zwd} = \Delta L_{ztd} - \Delta L_{zhd} - \Delta L_{ion}, \tag{1}$$

对流层干延迟  $\Delta L_{zhd}$  采用 Saastamoinen 模型求取:

$$\Delta L_{zhd} = (0.002\ 276\ 8 \pm 0.000\ 002\ 4) \times \frac{P_s}{f(\theta, H)} \times 10^{-3}, \tag{2}$$

其中:  $f(\theta, H) = 1 - 0.002\ 66 \times \cos 2\theta + 0.000\ 28 \times H$ ;  $\Delta L_{zhd}$  为对流层干延迟, mm;  $P_s$  为测站表面大气压, hPa;  $\theta$  为测站纬度, ( $^\circ$ );  $H$  为测站大地高, km。

大气可降水量  $\Delta L_{pwv}$  为湿延迟  $\Delta L_{zwd}$  与  $\Pi$  的乘积, 即:

$$\Delta L_{pwv} = \Pi \times \Delta L_{zwd} \tag{3}$$

其中:  $\Pi$  是水汽转换系数,  $\Pi = \frac{10^6}{[(k_3 \times T_m^{-1} + k_2) \times R_w \rho_{water}]}$ ;  $k_2, k_3$  为大气折射常数,  $k_2 = 16.48, K \cdot hPa^{-1}$ ;  $k_3 = (3.776 \pm 0.014) \times 10^5, K^2 \cdot hPa^{-1}$ ;  $R_w$  为水汽的气体常数,  $R_w = 4.613, J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$ ;  $\rho_{water}$  为降水密度,  $10^3\ kg/m^3$ ;  $T_m$  根据地区不同有不同取值。

青岛市位于我国东部, 为了提高  $\Pi$  的精度, 采用李建国等<sup>[12]</sup> 提出的适合我国东部地区的回归公式求取  $T_m$ , 即:

$$T_m = 44.05 + 0.81 \times T_s \tag{4}$$

其中,  $T_s$  为地面温度,  $K$ 。

### 2 可降水量在降水过程中的演变分析

台风麦德姆(Matmo)在 2014 年 7 月 23 日至 25 日对青岛产生影响, 由西南方向向东北方向行进。全市出现暴雨到大暴雨, 平均降雨量达 100~150 mm, 局部超过 250 mm, 强降雨主要集中在 24 日夜间至 25 日白天。通过对 2014 年 7 月 22 日至 25 日 4 天的山科大站 CORS 观测数据进行处理, 获取其每小时对应的 PWV 值, 与台子沟站观测到的降水资料进行对比: 22 日全天无降水, PWV 值存在震荡, 维持在 50~70 mm 的高位(图 1), 这为强降水提供了充足的水汽补给。PWV 值由 23 日 4 时的 67.9 mm 迅速下降到 6 时的 35.3 mm(图 2), 其下降率达 16.3 mm/h; PWV 下降 5 h 后(即在 10 时)发生降水。

结合 22, 23 日资料分析可知: 降水发生前的一段时间(24 h 以上), PWV 值维持在高位稳定, 未出现大幅度震荡, 为降水提供充足的水汽补给。PWV 值急剧下降 5 h 后, 降水发生在 10 时、11 时, 持续时间较短。

10 时的降水量达到了 10.8 mm/h。PWV 值在下降到最低点 3 h 后便上升到了降水发生前的平均水平,这与降水发生时间较短有关,也为接下来的降水提供了充足的水汽。

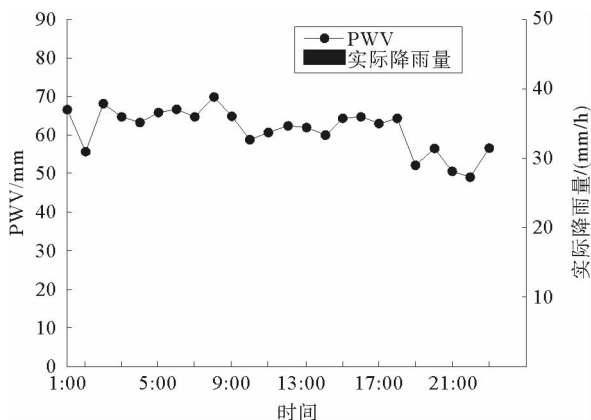


图 1 台子沟站 PWV 变化  
与实际降水量的关系 (2014-07-22)

Fig. 1 The relationship between PWV variation and actual precipitation of Taizigou Station(2014-07-22)

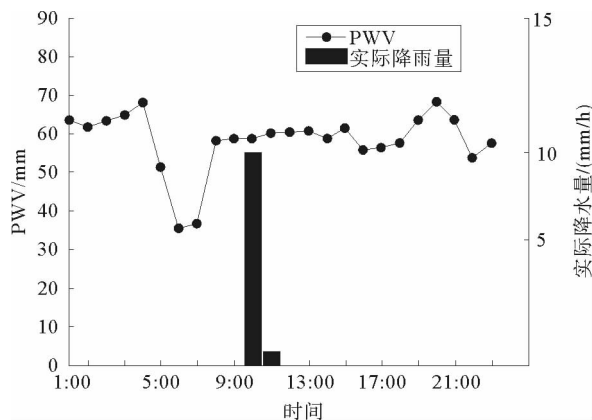


图 2 台子沟站 PWV 变化  
与实际降水量的关系 (2014-07-23)

Fig. 2 The relationship between PWV variation and actual precipitation of Taizigou Station(2014-07-23)

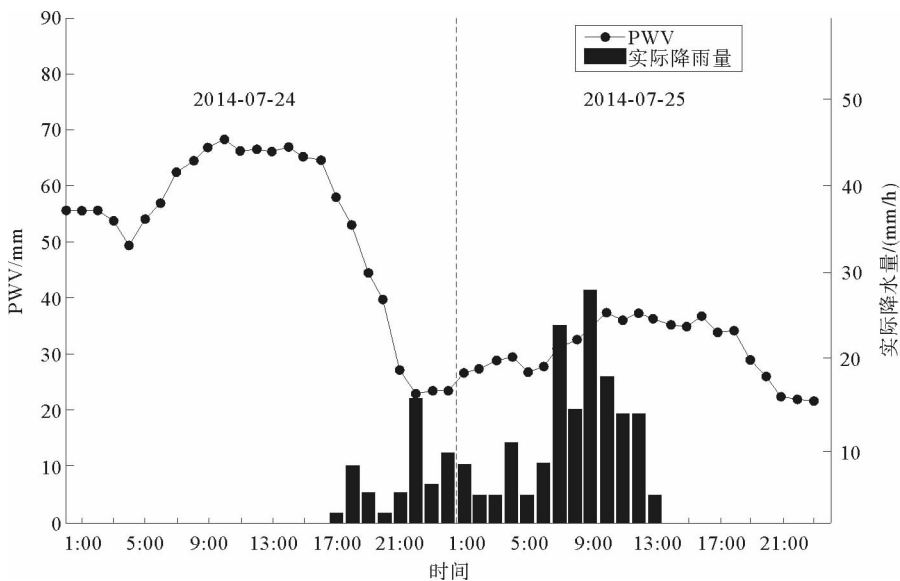


图 3 台子沟站 PWV 变化与实际降水量的关系 (2014-07-24—25)

Fig. 3 The relationship between PWV variation and actual precipitation of Taizigou Station(2014-07-24—25)

接下来在 24 日 4 时至 11 时, PWV 呈短时上升(图 3), 由 4 时的 49.1 mm 上升到了 10 时的 68.2 mm, 幅度较大, 上升后维持了 5 h 左右。24 日 11 时至 16 时, PWV 值出现了小幅下降; 24 日 16 时, PWV 值出现急剧下降, 下降后的最小值 24.3 mm 在 25 日 0 时出现, 下降速率达到了 8.14 mm/h。在 PWV 值下降后的 6 h, 出现降水(24 日 17 时), 降水量为 0.2 mm/h; 18 时降水量开始增大, 达到 4.9 mm/h。24 日每小时降水量最大值出现在 22 时, 其值为 14.3 mm。25 日的降水量最大值 29.6 mm/h 出现在 9 时, 为暴雨水平(20~30 mm/h)。降水从 24 日的 17 时持续到 25 日的 13 时, 总降水量达到 194.8 mm, 已达到大暴雨水平(100~200 mm/24 h)。降水结束后, PWV 值下降到 20~30 mm, 趋于稳定。由上述分析可以看出, 本次降水持续时间长, 对应的 PWV 值整体呈下降趋势, 后期有轻度震荡, 在震荡过程的上升阶段降水量增大, 这与黄振

等<sup>[13]</sup>的研究一致。

### 3 验证性分析

对于区域 GPS 气象站点布设,当 GPS 观测截止高度角为  $15^\circ$  时,反演 PWV 值的代表性有效半径最大值为  $30\text{ km}$ <sup>[8,14]</sup>。张鹏飞等<sup>[15]</sup>在对单 GPS 站获取空间水汽分布的研究中也提到,单 GPS 站所能覆盖的范围约为  $14.9\text{ km}$ 。

本研究选取与 CORS 站相距约  $14\text{ km}$  的青岛站获得的实际降水资料进行分析:23 日 4 时至 6 时,PWV 值出现了急剧下降(图 4),下降速率达  $22.68\text{ mm/h}$ ,在下降 5 h 后,即在 23 日 9 时出现降水,在 10 时的降水量达到了  $48.2\text{ mm/h}$ ,为大暴雨水平( $31\sim 50\text{ mm/h}$ )。随后 PWV 值上升到了下降前的均值水平,这同样与降水时间较短有关。在 24 日 14 时,PWV 值开始下降,但幅度较小,在下降后的第 3 h 开始出现降水;在 24 日 17 时至 25 日 1 时,PWV 值出现连续下降,且幅度较大,在连续下降后的 6 h,即 25 日 7 时,每小时降水量达  $24.7\text{ mm}$ ,为暴雨水平( $20\sim 30\text{ mm/h}$ )。青岛站总降水量为  $197.9\text{ mm}$ ,已达到大暴雨水平( $100\sim 200\text{ mm/24h}$ )。降水结束后,PWV 值趋于稳定,这与本文第 2 部分对可降水量在降水过程中的演变分析一致,也说明了该分析的正确性。

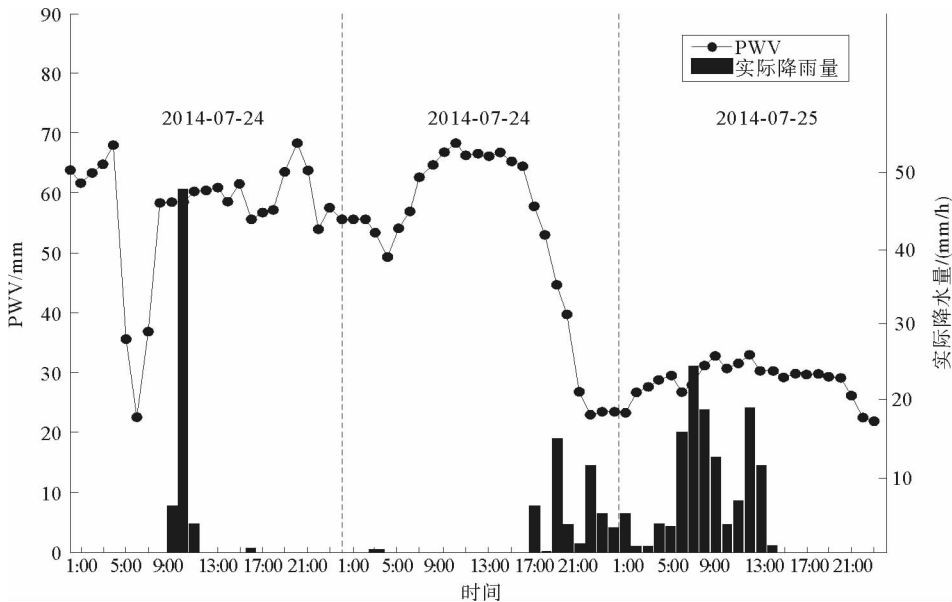


图 4 青岛站 PWV 变化与实际降水量的关系(2014-07-23—25)

Fig. 4 The relationship between PWV variation and actual precipitation of Qingdao Station(2014-07-23—25)

综上所述,在台风过境降水发生前 12 h,PWV 值维持在高位,存在震荡;在降水发生 6 h 前 PWV 值有升高情况,但升幅不大;在降水发生前的 3 h,PWV 值下降,且下降速率较大。PWV 值高位稳定一段时间,急剧下降后 3~6 h 会伴有强降水出现。

### 4 结论

通过对 2014 年 7 月的一次暴雨过程与可降水量的对比分析,得到以下结论:

1)暴雨发生前,PWV 值经过了较长时间(一般在 24 h 以上)高位稳定,为暴雨的形成准备了充分的水汽条件。

2)PWV 值  $\geq 50\text{ mm}$  稳定持续时间越长,实际降水量越大。

3)PWV 值出现急剧下降后的 3~6 h 会出现降水,且下降幅度越大降水量越大,成正比关系。

需要说明的是,本次仅使用单站 CORS 进行对比分析,在一定程度上反映了夏季台风过境期间 PWV 值

变化与实际降水的关系,但对不同季节和不同纬度地区的降水过程分析与预报还需要进一步研究。

致谢:感谢青岛市气象局提供实际降水量数据。

#### 参考文献:

- [1]赵静涛,宋淑丽,朱文耀. EAR-Interim 应用于中国地区地基 GPS/PWV 计算的精度评估[J]. 武汉大学学报:信息科学版, 2014, 39(8):935-939.  
Zhao Jingyang, Song Shuli, Zhu Wenyao. Accuracy assessment of applying EAR-Interim reanalysis data to calculate ground-based GPS/PWV over China[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2014, 39(8):935-939.
- [2]Bevis M, Businger S, Heming T A, et al. GPS meteorology remote sensing of atmospheric water vapor using the Global Positioning System[J]. Journal of Geophysical Research, 1992, 97(D14):15787-15801.
- [3]Rocken C, Hove T V, Johnson J, et al. GPS/STORM-GPS sensing of atmospheric water vapor for meteorology[J]. Journal Atmospheric and Ocean Technology, 1995, 12(3):468-478.
- [4]毛节泰. GPS 的气象应用[J]. 气象科技, 1993(4):45-49.  
Mao Jietai. Meteorological application of GPS[J]. Meteorological Science and Technology, 1993(4):45-49.
- [5]宋淑丽,朱文耀,程宗颐,等. GPS 信号斜路径方向水汽含量的计算方法[J]. 天文学报, 2004, 45(3):338-346.  
Song Shuli, Zhu Wenyao, Cheng Zongyi, et al. Estimation of slant water vapor along GPS ray paths[J]. Acta Astronomica Sinica, 2004, 45(3):338-346.
- [6]毛辉,毛节泰,毕研盟,等. 遥感 GPS 倾斜路径信号构筑水汽时空分布图[J]. 中国科学 D 辑:地球科学版, 2006, 36(12):1177-1186.  
Mao Hui, Mao Jietai, Bi Yanmeng, et al. Constructing Temporal and spatial distribution of water vapor figures by GPS remote sensing along slant rays[J]. Science in China Series D: Earth Sciences, 2006, 36(12):1177-1186.
- [7]李延兴,徐宝祥,胡新康,等. 应用地基 GPS 技术遥感大气柱水汽量的试验研究[J]. 应用气象学报, 2001, 12(1):61-68.  
Li Yanxing, Xu Baoxiang, Hu Xinkang, et al. Test and study of the Earth-based GPS technique for remote sensing of atmospheric precipitable water[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2001, 12(1):61-68.
- [8]丁金才. GPS 气象学及其应用[M]. 北京:气象出版社, 2009:34-35, 75-84, 109-128.
- [9]曹云昌,方宗义,李成才,等. 利用 GPS 和云图资料监测北京地区中小尺度降水的研究[J]. 高原气象, 2005, 24(1):91-96.  
Cao Yunchang, Fang Zongyi, Li Chengcai, et al. Test on monitoring meso and micro-scale precipitation in Beijing using GPS data and satellite image[J]. Plateau Meteorology, 2005, 24(1):91-96.
- [10]叶其欣,杨露华,丁金才,等. GPS/PWV 资料在强对流天气系统中的特征分析[J]. 暴雨灾害, 2008, 27(2):141-148.  
Ye Qixin, Yang Luhua, Ding Jincai, et al. Application of GPS/PWV data to forecast strong convection weather in Shanghai [J]. Torrential Rain and Disasters, 2008, 27(2):141-148.
- [11]李征航,黄劲松. GPS 测量与数据处理[M]. 2 版. 武昌:武汉大学出版社, 2010:160-162.
- [12]李建国,毛节泰,李成才,等. 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, 1999, 57(3):283-291.  
Li Jianguo, Mao Jietai, Li Chengcai, et al. The approach to remote sensing of water vapor based on GPS and linear regression Tm in eastern region of China[J]. Acta Meteorological Sinica, 1999, 57(3):283-291.
- [13]黄振,李万彪,梁军. GPS 遥感大气可降水量在降水天气过程分析中的应用[J]. 气象与环境学报, 2013, 29(4):31-36.  
Huang Zhen, Li Wanbiao, Liang Jun. Application of precipitable water vapor from ground based GPS data to analysis of precipitation weather process[J]. Journal of Meteorology and Environment, 2013, 29(4):31-36.
- [14]丁金才,叶其欣,马晓星,等. 区域 GPS 气象站点合理布设的几点依据[J]. 气象, 2006, 32(2):35-39.  
Ding Jincai, Ye Qixin, Ma Xiaoxing, et al. Some bases of reasonable distribution of GPS stations within an area GPS/MET network[J]. Meteorological Monthly, 2006, 32(2):35-39.
- [15]张鹏飞,张双成,杨晓春,等. 利用单 GPS 站获取空间水汽分布特征[J]. 测绘通报, 2014(1):9-11.  
Zhang Pengfei, Zhang Shuangcheng, Yang Xiaochun, et al. Getting distribution characteristics of spatial water vapor with one GPS station slant-path data[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2014(1):9-11.

(责任编辑:高丽华)