

DOI :10.3876/j.issn.1000-1980.2011.04.018

# 利用区域 GPS 观测网探测夏季降雨中大气可降水量

魏浩翰<sup>1,2</sup>,何秀凤<sup>1</sup>

(1.河海大学遥感与空间信息工程研究所,江苏 南京 210098;2.南京林业大学土木工程学院,江苏 南京 210037)

摘要:采用南京区域 GPS 观测网的观测数据,结合地表大气参数,计算出夏季降雨过程中的相对 GPS 大气可降水量;再加入国内 3 个 IGS 参考站的观测数据组成超长基线,计算出同时间段内的绝对 GPS 大气可降水量,并与探空数据所得的大气可降水量进行对比。结果表明:GPS 大气可降水量与探空数据所得的大气可降水量有较强的一致性;在精确性和相关性方面,绝对 GPS 大气可降水量优于相对 GPS 大气可降水量;绝对 GPS 大气可降水量的变化能直观地反映地表实际降水量。

关键词:区域 GPS 观测网;大气可降水量;探空数据;地表实际降水量

中图分类号: 文献标志码:A 文章编号:1000-1980(2011)04-0454-04

大气中的水汽在全球气候系统、天气动力系统、气候灾害监测、水文学及空间大地测量等领域占有极其重要的地位,然而目前常规水汽探测手段的不足严重制约着相关学科的发展。地基 GPS 遥感水汽技术作为新型的大气探测手段,目前已成为常规探测水汽手段的有力补充。随着 GPS 导航定位技术的飞速发展和国内各地区连续运行 GPS 观测网的广泛建立,极大地推动了国内地基 GPS 遥感水汽技术的理论研究及业务推广,并成为当前国内大气探测领域的研究热点<sup>[1]</sup>。

利用区域 GPS 观测网的观测数据计算测站上空的大气可降水量( precipitable water vapor, PWV )时,可利用双差技术消除卫星钟差的影响,但由于区域 GPS 网中测站间的距离较近,卫星高度角非常接近, GPS 卫星与接收机间的信号传输路径基本相同,大气延迟也基本相同,从而导致各测站的天顶延迟具有较强的相关性<sup>[2-4]</sup>。因此,利用双差技术解算得到的 GPS PWV 是测站间的相对 PWV(以下简称相对 PWV),而不是各 GPS 测站上空的绝对 PWV(以下简称绝对 PWV)<sup>[5-8]</sup>。本文在解算区域 GPS 网数据时,引入 3 个超过 500 km 的国际 GPS 服务( International GPS Service, IGS )参考站组成超长基线,以减少测站间天顶延迟的相关性,从而得到各测站的绝对 PWV。将 GPS 观测数据计算得到的相对 PWV、绝对 PWV 与探空数据计算得到的 PWV(以下简称探空 PWV)、地表实际降水量进行比较后可知,利用区域 GPS 观测网监测大气水汽的变化,可为中小尺度天气预报提供可靠补充。

## 1 利用地基 GPS 计算 PWV

大气层中的对流层延迟、电离层延迟是 GPS 精密定位的主要误差源之一。电离层延迟影响可以利用双频载波信号观测予以消除,但对流层延迟的影响,只能通过一定的模型将其影响降低到最小。对流层延迟  $Z_t$  又分为静力学延迟  $Z_h$  和湿延迟  $Z_w$ ,三者之间的关系可表示为<sup>[9]</sup>

$$Z_t = Z_h + Z_w \tag{1}$$

GPS 信号的  $Z_t$  可通过 GPS 接收机精确坐标反算得出; $Z_h$  可通过不同模型推算得到,常用的模型包括 Hopfield 模型、Saastamonien 模型、EGNOS 模型等。由于在各 GPS 观测站同时观测地表气压,本文根据 Saastamonien 模型计算  $Z_h$ :

$$Z_h = \frac{(2.279 \pm 0.0024)P_s}{1 - 0.00266\cos(2\lambda) - 0.00028H} \tag{2}$$

式中: $P_s$ ——测站地表气压, hPa; $\lambda$ ——站点的地理纬度, rad; $H$ ——站点海拔高度, km.

将式(1)和式(2)联立可得  $Z_w$ , 再根据 PWV 与  $Z_w$  的关系, 可由 GPS 观测数据计算 PWV<sup>[10]</sup>:

$$P_w = \frac{Z_w}{10^{-6}(k'_2 + k_3/T_m)R_w\rho} \tag{3}$$

式中: $P_w$ ——PWV; $R_w$ ——水汽的气体常数, 通常取 461.495 J/(kg·K); $k'_2$ ,  $k_3$ ——经验常数,  $k'_2 = 16.5$  K/hPa,  $k_3 = 3.776$  K<sup>2</sup>/hPa; $\rho$ ——液态水的密度; $T_m$ ——加权平均大气层温度.

本文加权平均大气层温度采用中国大陆地区的经验公式<sup>[11]</sup>:

$$T_m = 53.1868 + 0.7956 T_s \tag{4}$$

其中  $T_s$  为地表温度.

2 试验方法

南京市 GPS 观测网主要由 5 个 GPS 测站组成, 分别设在南京市区、江宁、六合、浦口、栖霞, 基线最长为 96 km, 最短为 31 km, 如图 1 所示. 由前文可知, 利用双差技术处理南京 GPS 观测网的数据, 得到的是相对 PWV, 为了得到绝对 PWV, 引入 3 个 IGS 参考站组成超长基线(基线长度大于 500 km), 分别为北京、武汉、长春, 与南京市区参考站组成的基线长度分别为 879 km, 542 km 和 1426 km. 当地气象部门预报 2009 年 7 月 28 日前后有中到大雨, 为了验证夏季降雨前后相对 PWV、绝对 PWV 与探空 PWV 的关系, 及其与地表降水的关系, 采用 7 月 27—29 日共 72 h 的 GPS 观测数据进行研究. 探空 PWV 来自于南京市气象局探空基地获得的探空数据, 每天 08 00 和 20 00 各观测 1 次, 时间间隔为 12 h; 地表实际降水量在每个 GPS 测站附近采集, 采样频率为 1 h.

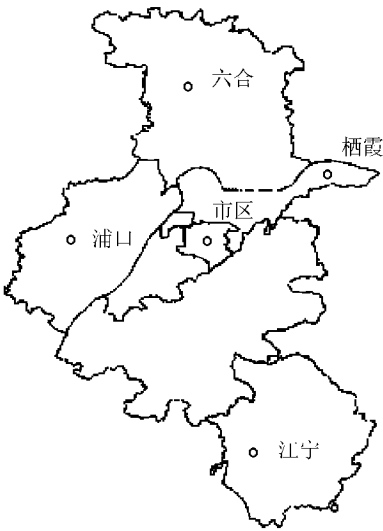


图 1 南京市 GPS 网  
Fig. 1 Nanjing GPS network

采用 GAMIT 软件对南京市 GPS 观测网观测资料进行处理, 获取各站的对流层延迟. 处理策略为: 数据采样率为 30 s, 卫星截止高度角为 15°, 采用 IGS 精密星历估计每 1 h 的对流层延迟, 并结合地面气象资料求出 PWV. 具体过程为:

- a. 计算对流层延迟. 在载波相位观测方程中将对流层延迟作为未知参数, 在解算过程中对流层延迟作为 GPS 处理结果的改正值得到, 精度可以达到 mm 量级.
- b. 分离出湿延迟. 根据测站大气压和测站位置坐标采用静力学延迟模型计算静力学延迟, 对流层延迟与静力学延迟差值即为湿延迟.
- c. 计算 PWV. 通过湿延迟与 PWV 之间的正比函数关系, 求解出沿天顶方向的 PWV.

3 结果分析

3.1 绝对 PWV、相对 PWV 与探空 PWV 的关系

图 2 是 72 h 内利用南京市 GPS 观测网观测数据计算的相对 PWV 与探空 PWV 随时间的变化曲线, 图 3 是加入长距离 IGS 参考站数据后所得的绝对 PWV 与探空 PWV 随时间的变化曲线. 从图 2 和图 3 可以看出, 无论是绝对 PWV 还是相对 PWV, 其数值始终在探空 PWV 上下的一定范围内浮动, 变化趋势均与探空 PWV 保持较高的一致性, 但是相较绝对 PWV, 相对 PWV 的数值波动较大. 绝对 PWV、相对 PWV 与探空 PWV 的关系详见表 1. 从表 1 可以看出, 与探空 PWV 相比, 无论是偏差量还是相关系数, 绝对 PWV 均优于相对 PWV. 此外, 由于 GPS 测站与探空气象观测站之间存在一定的空间距离, 不能进行一致性观测比较, 导致距离最远的江宁站的 PWV 与探空 PWV 的相关性比其他 4 个站的略差.

3.2 绝对 PWV 与地表实际降水量的关系

如图 4 所示, 选取距离探空站最近的南京市区测站数据计算得到的绝对 PWV, 对其 72 h 的变化量与地表实际降水量进行比较.

- a. 8 h 前后绝对 PWV 激增, 而 14 h 开始出现明显降水, 两者相隔 6 h; 14 ~ 24 h 平均降水量为 6.11 mm/h.

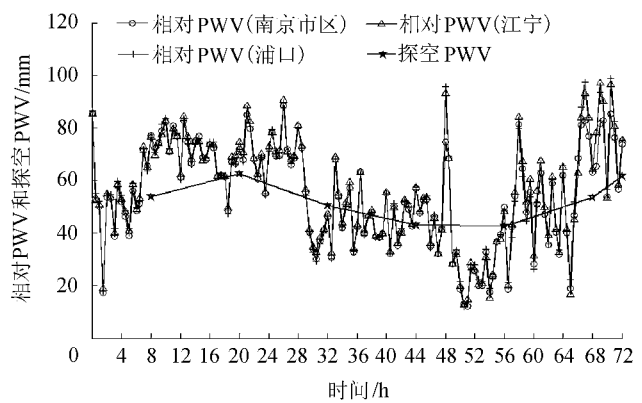


图 2 相对 PWV 与探空 PWV 随时间的变化

Fig. 2 Time series of relative PWV and radiosonde PWV

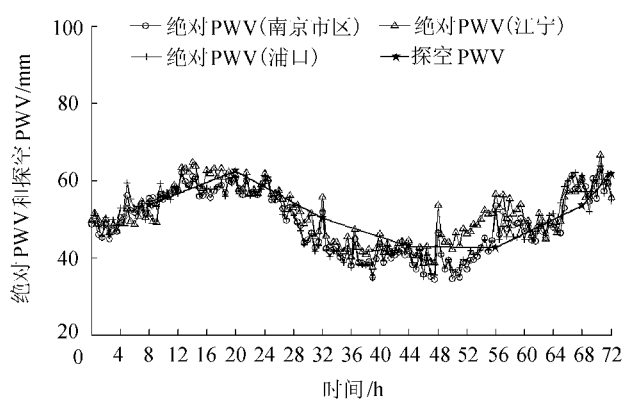


图 3 绝对 PWV 与探空 PWV 随时间的变化

Fig. 3 Time series of absolute PWV and radiosonde PWV

表 1 绝对 PWV、相对 PWV 与探空 PWV 比较

Table 1 Comparison of absolute PWV , relative PWV and radiosonde PWV

| 测站   | 与探空站点的距离/km | 平均偏差/mm |        | 相关系数   |        |
|------|-------------|---------|--------|--------|--------|
|      |             | 绝对 PWV  | 相对 PWV | 绝对 PWV | 相对 PWV |
| 南京市区 | 2           | 1.41    | 8.71   | 0.9394 | 0.7133 |
| 栖霞   | 11          | 1.96    | 11.79  | 0.9407 | 0.6333 |
| 浦口   | 15          | 1.63    | 7.78   | 0.9638 | 0.6558 |
| 六合   | 16          | 0.41    | 0.12   | 0.9356 | 0.6336 |
| 江宁   | 54          | 0.85    | 9.83   | 0.7292 | 0.5999 |

前 24 h 的降水过程中 ,绝对 PWV 总量为 55.04 mm ,实际降水总量为 61.1 mm ,水汽的变化与地表实际降水量的变化呈基本一致的趋势 .

b. 24 ~ 36 h ,绝对 PWV 值呈逐渐下降的趋势 ,相应的时间段内地表实际降水量持续下降 ,从 24 h 的 7.6 mm/h 下降至 36 h 的 0.7 mm/h ,37 ~ 48 h ,绝对 PWV 值在 40 mm 附近波动 ,这个时间段地表实际降水量没有大的改变 ,在 3 mm/h 附近波动 .

c. 在第 48 h 的 1 h 内 ,绝对 PWV 值从 34.39 mm 陡增至 46.51 mm ,2 h 后地表实际降水量也增至 8.8 mm/h ,这表明绝对 PWV 的变化能直观地反映地表实际降水量的变化 .至 62 h 降水停止 ,大气中的水汽开始继续汇聚 ,绝对 PWV 也相应地继续攀升 .

从以上分析可以看出 ,绝对 PWV 的变化和地表实际降水量的变化显示了降水与水汽汇聚的极好配合 :绝对 PWV 最大值在时间上要早于降水峰值 ,即降水相对于水汽的汇聚有一定时间的延迟性 ,这是由于当垂直方向上的绝对 PWV 累积达到一定值时 ,才能产生降水 ,产生降水时 ,相应的绝对 PWV 也从峰值开始下降 ;当降水停止后 ,水汽重新开始汇聚 ,绝对 PWV 也继续上升 .

## 4 结 论

a. 与探空 PWV 相比 ,在精确性和相关性方面 ,绝对 PWV 均优于相对 PWV .因此 ,利用区域 GPS 观测网的观测数据计算 PWV ,需加入距离大于 500 km 的 GPS 参考站数据组成超长基线 ,以获取绝对 PWV .

b. 由绝对 PWV 与地表实际降水量的对比可知 ,两者具有很强的相关性 ,降水一般在绝对 PWV 迅速增加的 4 ~ 6 h 内出现 ,并且当绝对 PWV 大幅度地突升或突降时 ,就预示着未来降雨过程的开始或结束 .绝对 PWV 的最大值总是在时间上早于降水峰值 ,说明绝对 PWV 相对于降雨的发生有一定的时间提前性 .

c. 本文利用 GPS 观测网的观测数据计算的绝对 PWV 与探空 PWV 比较有较强的相关性 ,验证了 GPS 监测大气水汽变化算法的正确性 ,与常规的探测方法相比具有全天候、实时、连续性等独特的优势 ,可为中小尺度天气预报提供有力的依据 .

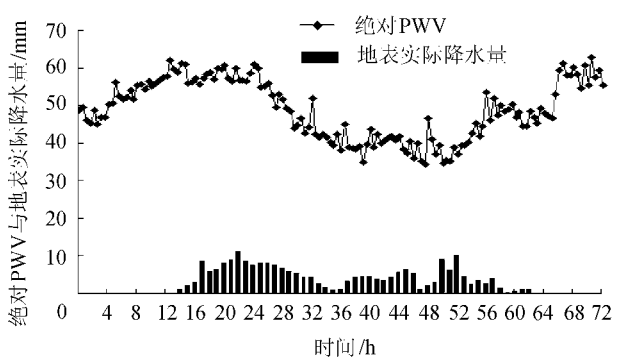


图 4 绝对 PWV 与地表实际降水量的比较

Fig. 4 Comparison of absolute PWV and surface rainfall

参考文献：

[ 1 ] BEVIS M ,BUSINGER S ,Herring T A ,et al. GPS meteorology :mapping zenith wet delays onto precipitable water[ J ]. Journal of Applied Meteorology ,1994 ,33( 3 ) :379-386.

[ 2 ] CHRISTIAN R ,VAN H ,JAMES J ,et al. GPS/STORM-GPS sensing of atmospheric water vapor for meteorology[ J ]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology ,1995 ,12( 4 ) :468-478.

[ 3 ] BRUYNINX Bruyninx. Comparing GPS-only with GPS + GLONASS positioning in a regional permanent GNSS network[ J ]. GPS Solution , 2007 ,11( 2 ) :97-106

[ 4 ] 常亮 ,何秀凤. 综合 GPS 和 NCEP 在区域降水预报中的应用研究[ J ]. 中国科学 :物理学 力学 天文学 ,2010 40( 5 ) :685-692. ( CHANG Liang ,HE Xiu-feng. Regional precipitation forecast using GPS and NCEP [ J ]. Scientia Sinica :Physica ,Mechanica & Astronomica ,2010 40( 5 ) :685-692.( in Chinese ))

[ 5 ] ROCKEN C ,ANTHES R ,EXNER M ,et al. Analysis and validation of GPS/MET data in the neutral atmosphere[ J ]. Journal of Geophysical Research ,1997 ,102( 12 ) :29849-29866.

[ 6 ] BOCK O ,BOUIN M N ,WALPERSDORF A ,et al. Comparison of ground-based GPS precipitable water vapour to independent observations and NWP model reanalyses over Africa[ J ]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society ,2007 ,133( 4 ) :2011-2027.

[ 7 ] BASTIN S ,CHAMPOLLION C ,BOCK O ,et al. On the use of GPS tomography to investigate water vapor variability during a Mistral/sea breeze event in southeastern France[ J ]. Geophysical Research Letters ,2005 ,32( 3 ) :1907-1918.

[ 8 ] KURSINSKI E R ,BENNETT R A ,GOCHIS D ,et al. Water vapor and surface observations in northwestern Mexico during the 2004 NAME enhanced observing period[ J ]. Geophysical Research Letters ,2008 ,35( 7 ) :L03815.

[ 9 ] 杜瑞林 ,乔学军 ,王琪 ,等. 用地基 GPS 资料分析大气可降水汽总量[ J ]. 大地测量与地球动力学 ,2005 ,25( 3 ) :121-123.( DU Ruilin ,QIAO Xue-jun ,WANG Qi ,et al. Analysis of integrated precipitation water vapor sensed by ground-based GPS[ J ]. Journal of Geodesy and Geodynamics ,2005 ,25( 3 ) :121-123.( in Chinese ))

[ 10 ] DOUSA J. Evaluation of tropospheric parameters estimated in various routine GPS analysis[ J ]. Physics and Chemistry of the Earth ,2004 , 29 :167-175.

[ 11 ] 李建国 ,毛节泰 ,李成才. 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 ) :283-292( LI Jiang-uo ,MAO Jie-tai ,LI Cheng-cai. The approach to remote sensing of water vapor based on GPS and linear regression on  $T_m$  in eastern region of China[ J ]. Acta Meteorologica Sinica ,1999 ,57( 3 ) :283-292.( in Chinese ))

Detection of precipitable water vapor during summer rainfall using regional GPS network

WEI Hao-han<sup>1 2</sup> , HE Xiu-feng<sup>1</sup>

- ( 1. *Institute of Remote Sensing and Spatial Information Engineering , Hohai University , Nanjing 210098 , China ;*  
2. *College of Civil Engineering , Nanjing Forestry University , Nanjing 210037 , China* )

**Abstract** : The relative GPS precipitable water vapor( PWV ) during summer rainfall was estimated using the observation data of Nanjing regional GPS network and surface meteorological sensors. The absolute GPS PWV at the same time was calculated using the observation data of Nanjing regional GPS network and three IGS reference stations. Comparison of the absolute GPS PWV and PWV estimated from radiosondes data shows that there is a good agreement between them , the accuracy and correlativity of absolute GPS PWV are better than those of the relative GPS PWV , and the variation of absolute GPS PWV can directly reflect the changes of surface rainfall.

**Key words** : regional GPS network ; precipitable water vapor ; radiosonde data ; surface rainfall