# 应用区域地基全球定位系统观测分析 北京地区大气总水汽量<sup>\*</sup>

梁 丰1) 李成才2) 王迎春1) 毛节泰2) 方宗义3)

1) (北京市气象局,北京 100089)

2) (北京大学物理学院大气科学系,北京 100871)

3) (国家卫星气象中心,北京 100081)

**摘 要**利用2000年6月1日~8月11日北京地区地基全球定位系统(Globe Positioning System)网遥感大气总水汽量试验的观测资料,分析了北京地区夏季大气总水汽量的时空 变化,研究了大气总水汽量与日平均温度、地面水汽压和降水的关系。研究结果表明:大 气总水汽量存在明显的时空变化,对于地理位置基本相近的台站,海拔高度的影响比较明 显,一般情况下高山站的水汽总量低于平原站;在晴天,地面水汽压与大气总水汽量有较 好的相关性,而在云雨日,由于高低层大气湿度的变化常常不同步,用地面水汽压估算的 大气总水汽量具有较大的偏差;大气总水汽量短时间内的快速增加往往对应有降水过程出 现,但总水汽量的大小与降水量之间并没有明显的相关,在降水预报中应综合考虑总水汽 量的前期平均水平、短时的增幅和峰值大小等条件的影响。

关键词: 地基全球定位系统; 大气总水汽量; 地面水汽压

### 1 引言

水汽作为大气的一种主要成分,它的分布极不均匀,时空变化很大。尽管它在大 气中的含量不高,但它的重要性却不容低估。它的时空分布以及由于相变所产生的异 常高的潜热,显著地影响着大气的垂直稳定度和强对流系统的结构和演变。水汽还是 大气中重要的长波辐射和吸收物质,它对地气系统的辐射收支及全球气候变化也有重 要的作用。尽管水汽在大气的物理、化学过程中具有如此重要的作用,但它却是地球 大气主要成分中人们了解和描述得还不够充分的成分之一。

近年来地基全球定位系统(GPS)技术作为一种新的遥感探测技术被应用于大气水 汽观测方面,取得了一些成果<sup>[1-8]</sup>。与以往的观测手段(如探空、微波辐射计、飞机 观测等)相比,它具有成本低、精度高、时间分辨率高、能够全天候观测的优点,因 此可以被广泛使用,美国等发达国家已经开始发展业务的地基 GPS 观测网<sup>[9]</sup>。但是地 基 GPS 只能遥测观测路径上的大气总水汽量,而不能提供水汽的垂直分布信息,因此 研究大气水汽总量(或称大气总水汽量 W)在天气、气候分析和预报中的应用是充分 利用这一新的数据资源的基础。

<sup>2001-03-26</sup> 收到, 2001-09-04 收到再改稿

<sup>\*</sup>北京市科委资助项目 H 010510120119

目前,对大气总水汽量在短期天气预报中的应用研究还刚刚开始,主要涉及以下 几个方面:(1)由于大气总水汽量反映了大气柱中水汽总的最大有效潜热,因此可以 引入中尺度数值预报模式,对模式的数据同化给出很强的约束,从而改进湿度场的分 析质量,提高预报准确率<sup>[10,11]</sup>;(2)使用高时空分辨率的 GPS 水汽观测作为独立的数 据源来校正数值预报模式<sup>[12,13]</sup>;(3)研究大气总水汽量及其时间变化率与降水强度和 范围的关系<sup>[14,15]</sup>,考察将其直接应用于短时预报中的可能。

本文利用 2000 年夏季北京地区地基 GPS 加密观测试验数据,研究北京地区大气总 水汽量的局地变化特征及其在暴雨分析和预报中的作用。

#### 2 观测试验概述

2000 年 6 月 1 日 ~ 8 月 11 日,北京市气象局、北京大学和国家卫星气象中心三家 单位合作,在京津地区进行了我国首次区域性地基 GPS 网遥感大气总水汽量的试验,

共设10个观测站(图1),站点间的平均 距离大约为35 km 左右,其中南郊(探空 站)、延庆、平谷、顺义、密云和斋堂的试 验站点设在当地的气象观测站、海淀、十 三陵、房山、蓟县的试验站点距离最近的 地面观测站有一定的距离。由于数据通讯 条件的限制,对观测数据的处理是在整个 试验结束后进行的。在试验期间定期下载 各站的观测数据、导航星历,收集相应的 地面气压、气温和湿度等气象观测数据, 并下载了位于武汉、上海、拉萨、乌鲁木 齐和国外的部分跟踪站数据,以及国际 GPS 服务 (the International GPS Service) 提供的精密星历,利用麻省理工学院 (MIT)的 GAMIT 软件对观测数据进行了 解算<sup>[16]</sup>,得到时间间隔 30 min 的对流层总



图 1 GPS/VAPOR 试验的站点分布示意图

延迟,然后利用地面气压、气温数据和天顶流体静力学延迟公式计算了 大气总水汽量 W<sup>[5]</sup>。与使用常规探空资料计算的积分水汽相比,在所有相同时刻,南郊站 GPS 反演 结果的总的均方差为 2.9 mm。

#### 3 观测结果分析

#### 3.1 北京地区大气总水汽量的时空变化

表1是10个测站2000年6月1日至8月10日的旬平均大气总水汽量,很明显6~ 8月北京地区的大气总水汽量是逐渐增加的,尤其以6月下旬到7月上旬增加最快,平 均增加了12.7 mm。7月下旬大气总水汽量出现一个低谷,8月上旬又快速增加。

GPS 站谣测大气总水汽量的旬平均值 表 1 mm 北京 天津 西北 西南 中部 东南 东北 站名 昌平 斋堂\* 房山 平谷 密云 延庆\* 海淀 南郊 顺义 蓟县 海拔高度/m 482.3 155.4 431.8 87.4 59.5 29.5 29.0 75.4 37.5 38.9 6月1~10日 18.49 22.32 20.52 23.44 23.49 24.44 23.24 23.25 6月11~20日 21.26 23.90 22.17 25.02 24.95 28 27 20.90 25.88 28.04 24.30 6月21~30日 31.42 28.80 34.07 33.03 34.69 33.74 33.62 32.20 26.66 \_ 47.85 47.05 7月1~10日 38.69 44.33 40.15 46.62 46.93 48.26 42.99 \_ 7月11~20日 45.69 40.72 47.30 47.63 48.51 51.91 50.88 54.74 46.38 39.08 7月21~31日 29.75 33.52 31.11 37.21 35.89 37.29 37.63 33.53 36.12 35.08 8月1~10日 38.94 45.44 41.31 47.52 47.94 49.13 48.35 47.89 46.31 45.75

注: - 为缺测, \* 为高山站

此外,从表1中还可看出延庆、斋堂这些高山站的大气水汽含量明显低于其他平 原站,而北京西北部地区的水汽含量又低于其它地区,这主要是因为一般情况下大气 中的水汽主要分布在500 hPa以下的大气中,海拔较高的地区的总水汽量因而要低于海 拔低的地区。

#### 3.2 大气总水汽量与日平均温度的关系

图2显示了试验期间南郊观象台站(54511)的日平均温度的变化与大气总水汽量 W值之间的关系,大气总水汽量与日平均温度基本呈反相关。这是不难理解的,大气 总水汽量W值的上升意味着该地区大气中水汽增多,出现云的概率增加,这将导致地 面接收的来自太阳的短波辐射减少,日平均温度降低。



图 2 2000 年 6 月 1 日 ~ 8 月 11 日南郊站的日平均温度和大气总水汽量 W 的时间序列图

#### 3.3 大气总水汽量与地面水汽压的关系

在研究地面水汽压(或露点)与大气总水汽量的关系方面,国内外已有许多工作<sup>[17~19]</sup>,大多是利用常规探空资料来计算大气总水汽量的,因此时间分辨率较粗,我 们试图利用高时间分辨率的 GPS 遥测资料来分析两者间的关系。

238

我们选用试验期间南郊站每3h一次的地面观测资料计算了地面水汽压,并与同时 刻的 GPS 遥测资料进行了比较。地面水汽压的计算公式为

 $e = a \times 10^{b/(c/t_{\rm d}+1)}$ ,

其中, t<sub>d</sub> 为露点温度, a、b、c 为经验常数,其值分别取为 6.11、7.5 和 237.3。分析 结果表明大气总水汽量 W 和地面水汽压 e 之间有较好的线性对应关系(图 3)。晴天 时,用地面水汽压计算的总水汽量与 GPS 的观测值之间的相关系数为 0.83,在云雨天 相关系数为 0.80。但与杨景梅等<sup>[17]</sup>的研究相比(相关系数 0.972,均方根误差 3.51 mm),我们的结果相关系数明显偏低,特别是云雨天,均方根误差达 7.46 mm,晴天 略好,均方根误差为 3.38 mm。分析其原因,我们认为在一般情况下,水汽含量是随 高度递减分布的,但当有对流活动发展时,低层湿空气向上输送,云内温度迅速增大 高于环境温度,使得饱和状态下的水汽总量急剧增加,从而导致大气总水汽量迅速增 加,但此时近地层的水汽含量的增长要落后于总水汽量的增加。在降水过程结束后, 云中的饱和水汽已转为雨滴降落到地面,总水汽量减少,而雨后地面比较潮湿,地面 水汽压的降低要落后于总水汽量的减少。因此,在晴天,用地面水汽压估算大气总水 汽量具有较小的误差,在气溶胶遥感以及气候研究中是有直接使用价值的;而在云雨 天,由于高、低层大气湿度的变化常常不同步,用地面水汽压计算的总水汽量有较大 的偏差,在我们的试验中,云雨天的最大正误差为 17.2 mm,最大负误差为 - 23.1 mm,这样大的误差是不能忽略不计的。



图 3 2000 年 6 月 13 日 ~ 8 月 11 日南郊站地面水汽压与大气总水汽量的散点图 (a)晴天;(b)云雨日

#### 3.4 大气总水汽量与降水的关系

我们将 2000 年 6 月 1 日 ~ 8 月 11 日的 30 min 间隔的 GPS 观测数据与相应的 12 h 累积降水量进行比较(图 4 仅给出了南郊站的结果,其他测站略)。在试验的 72 天中, 5 站以上出现降水的日数为 16 天,小于 5 站的降水日数为 13 天,南郊站出现降水的日 数为23 天(含微量降水,即观测值为 0.0)。我们发现,几乎对所有测站而言,在降水



图 4 2000 年 6 月 13 日 ~ 8 月 11 日南郊站大气总水汽量与 12 h 累积降水量时间序列图
 ——30 min 间隔的总水汽量;●日平均总水汽量;● 12 小时累积降水量

开始前的几个小时总水汽量都持续增长,这与毛节泰等<sup>1)</sup>对武汉、上海的 GPS 观测试 验的分析结果是一致的。此外我们还发现在降水开始前的一两天大气水汽总量也是连 续快速增长的,超过某个阈值时便出现降水,不同地区或同一地区不同时期这个阈值 是不同的。观测结果还表明,水汽总量的大小与降水量之间并没有明显的相关,比如7 月4日与7月27日各测站的日平均大气水汽总量以及之前两三天的增幅基本相当,但 前者出现了全市性的暴雨,后者却只在部分地区出现了小雨,这是因为前者尚属夏初, 北京地区的湿度相对较小,而后者已是北京的主汛期,大气中水汽含量的平均值已明 显高于前者。又如7月20日各站的日平均总水汽量与7月27日基本相近,但前期的增 幅小于后者,结果仅有房山站出现了0.6 mm 的降水。所以我们认为在分析大气水汽总 量与降水的关系时,应综合考虑前期平均水平、短时的增幅和峰值的大小等条件。

当中尺度雨团与天气尺度系统相配合时,由于得到充足的水汽输送,往往出现超 过本站上空可降水汽总量的暴雨。在此次观测试验期间,北京地区共出现了两次暴雨 过程,其中又以7月4~5日的过程更大,我们利用 GPS 的观测资料来分析此次暴雨过 程的水汽输送情况。

在7月4日08:00和20:00点(北京时间)的天气图(图5)上,500hPa上空河 套地区有一个中心强度580位势什米的低压中心,而辽东半岛附近为稳定的高压脊控制, 形成所谓的"东高"形势。从850hPa风场上可以看到,此次暴雨过程的水汽有两个来 源,一支来自东南海面由高压外侧的东南风携带到北京,另一支来自西南,在河套地区 的低压的牵引下北上到达北京。受高空低涡与偏南暖湿气流的影响,北京普降暴雨,部 分地区为特大暴雨,全市平均雨量为90mm,最大暴雨中心位于雁翅达328mm。

1) 毛节泰等,全球定位系统——气象学(GPS/MET)研究论文汇编(II),国家卫星气象中心、北京大学地球物理系,1999年12月,44~52



图 5 7月4日 500 hPa 高度场和 850 hPa 风场 (a) 08:00; (b) 20:00

此次暴雨过程大致可分为两个阶段,7月4日凌晨至傍晚为第一阶段,雨团从北京的西南部发展起来,稳定少动,降水主要集中在西部山区,主要时段为4日11:00~20:00时;4日夜至5日晨为第二阶段,东南部地区有雨团发展,逐渐向西北移动,降水主要集中在东南部平原和山前地区,主要时段为5日凌晨02:00~08:00时。

图 6 为 7 月 3 日 14:00 时 ~ 7 月 5 日 14:00 时的 GPS 观测水汽总量时间序列图,斋 堂、海淀和蓟县站纬度基本相同,房山、延庆站的经度基本相同,通过对比这两组站 点的观测,可以了解这次降水过程的水汽输送情况。图 6a 中斋堂站从 7 月 3 日 18:00 时起大气总水汽量开始增加,海淀站略晚半小时左右,蓟县站直到 7 月 4 日 00:00 时大 气总水汽量 W 值才开始增大;同样,从房山和延庆站的比较中可知,位于北部的延庆 站大气总水汽量 W 值的增加要晚于房山站约 2 h,这些差异表明暴雨开始前水汽是由 西南向东北输送的,并且南北方向的输送更快一些,这从同时段的大气水汽总量的水 平分布图(图略)上也可看出。





图 7 北京地区大气水汽总量的 3 小时差值图
等值线间隔 0.02 cm,实线为正,虚线为负
(a) 7 月 4 日 17:00~20:00;(b) 7 月 4 日 20:00~4 日 23:00;
(c) 7 月 4 日 23:00~5 日 02:00;(d) 7 月 5 日 05:00~08:00

为了更清楚地分析此次暴雨过程两个阶段水汽输送的异同,我们制作了北京地区 大气总水汽量 W 水平分布的3h差值图(图7)。与前面的分析一致,在第一阶段水汽 主要是从西南方向进入北京的,伴随着降水第一阶段的结束,大气水汽总量略有减低 (图7a),之后东南部地区又开始增湿(图7b),水汽逐渐向中部、西北部输送(图 7c)第二阶段降水开始。降水结束后(图7d),天气逐渐转晴,水汽总量降低。结合 850 hPa的流场分析可知,在暴雨过程的第一阶段,两支水汽通道都向北京地区提供了水 汽输送,因此水汽较第二阶段更充沛,降水量也相对大些,而在第二阶段,随着 500 hPa 低涡的南掉,阻挡了西南水汽向北京地区的输送,东南方向的水汽输送起主要作用。

#### 4 结 论

通过对 2000 年夏季北京地区地基 GPS 加密观测试验结果的分析,可以得到以下结果:

(1) 大气总水汽量存在明显的时空变化,对于地理位置基本相近的台站,海拔高度的影响比较明显,一般情况下高山站的水汽总量低于平原站。

(2)晴天,地面水汽压与大气总水汽量有较好的相关性,而在云雨日,由于高低 层大气湿度的变化常常不同步,用地面水汽压估算的大气总水汽量具有较大的偏差。

(3)大气总水汽量短时间内的快速增加往往对应有降水过程出现,但总水汽量的 大小与降水量之间并没有明显的相关,在降水预报中应综合考虑总水汽量的前期平均 水平、短时的增幅和峰值大小三个条件。

总之, 地基 GPS 的观测结果可用于短时降水的监测、预报和分析, 下一步我们将 尝试将这些观测数据同化到中尺度数值预报模式中, 以改善模式的湿度场分析, 提高 短期降水预报的准确性。

参考文献

- 1 Bevis, M., S. Businger, T. A. Herring, C. Rocken, R. A. Anthes, and R. H. Ware, GPS meteorology: Remote sensing of atmospheric water vapor using the global positioning system, J. Geophys. Res., 1992, 97, 15787 ~15801.
- 2 Rocken, C., T. Van Hove, J. Johnson, F. Solheim, R. Ware, M. Bevis, S. Chiswell, and S. Businger, GPS/ Storm—GPS sensing of atmospheric water vapor for meteorology, J. Atmos. Oceanic Technol., 1995, 12, 468 ~ 478.
- 3 Businger, S., and coauthors, The promise of GPS in atmospheric monitoring. Bull. Amer. Meteor. Soc., 1996, 77, 5~18.
- 4 Duan, J., and coauthors, GPS Meteorology: Direct estimation of the absolute value of precipitable water, J. Appl. Meteor., 1996, 35, 830 ~ 838.
- 5 李成才、毛节泰、李建国等, GPS 遥感水汽总量, 科学通报, 1999, 3, 333~336.
- 6 王小亚、朱文耀、严豪健等,地面 GPS 探测大气可降水量的初步结果,大气科学,1999,23,605~612.
- 7 Li Jianguo, and Mao Jietai, The approach to remote sensing of water vapor based on GPS and linear regression Tm in eastern region of China, Acta Meteor. Sinica, 1998, 12, 450 ~ 458.
- 8 Kuo, Y. H., X. Zou, and Y. R. Guo, Variational assimilation of precipitable water using a nonhydrostatic

mesoscale adjoint model. Part I: Moisture retrieval and sensitivity experiments, Mon. Wea. Rev., 1996, 124, 122 - 147.

- 9 Gutman, S. I., D. E. Wolfe, and A. M. Simon, Development of an operational water vapor remote sensing system using GPS; A progress report. FSL Forum, 1995, 12, 21 ~ 32.
- 10 Kuo, Y. H., X. Zou, and Y. R. Guo, Variational assimilation of precipitable water using a nonhydrostatic mesoscale adjoint model. Part I: Moisture retrieval and sensitivity experiments, *Mon. Wea. Rev.*, 1996, 124, 122 – 147.
- 11 Zou, X., and Y. H. Kuo, Rainfall assimilation through an optimal control of initial and boundary conditions in a limited - area mesoscale model, Mon. Wea. Rev., 1996, 124, 2859 ~ 2882.
- 12 Yang, X., B. Sass, G. Elgered, T. R. Emardson, and J. M. Johansson, A comparison of precipitable water vapor estimates by an NWP simulation and GPS observations, J. Appl. Meteor., 1999, 38, 941 ~956.
- 13 Cucurull, L., B. Navascues, G. Ruffini, et al., The use of GPS to validate NWP systems: The HIRLAM model, J. Atmos. Oceanic. Technol., 2000, 17, 773 ~ 787.
- 14 Zhou Xiuji et al., Atmospheric profiler and preliminary investigation on the monitoring of disastrous weather, Acta Meteor. Sinica, 1991, 5, 265 ~ 273.
- 15 杨红梅等,用单站探空资料分析对流层气柱水汽总量,气象,1998,9,8~11.
- 16 Department of Earth, Atmospheric, and Planetary Sciences of Massachusetts Institute of Technology, Scripps Institution of Oceanography of University of California at San Diego, Documentation for the GAMIT GPS Analysis Software, Release 9. 6. September 1997.
- 17 杨景梅、邱金桓,我国可降水量同地面水汽压关系的经验表达式,大气科学,1996,20,620~626.
- 18 Atwater, M. A., and J. T. Ball, Comparisons of radiation computations using observed and estimated precipitable water, Appl. Meteor., 1976, 15, 1319 ~1320.
- 19 Smith, W., Note on the relationship between total precipitable water and surface dew point, J. Appl. Meteor., 1966, 5, 726 ~ 727.

## An Analysis of Atmospheric Precipitable Water Based on Regional Ground – Based GPS Network in Beijing

Liang  ${\sf Feng}^{1)}$  , Li  ${\sf Chengcai}^{2)}$  , Wang  ${\sf Yingchun}^{1)}$  , Mao Jietai^{2)} , and  ${\sf Fang}\ {\sf Zongyi}^{3)}$ 

1) (Beijing Meteorological Bureau, Beijing 100089)

2) (Department of Atmospheric Sciences, School of Physics, Peking University, Beijing 100871)

3) (National Satellite Meteorological Center, Beijing 100081)

**Abstract** In this study, atmospheric water vapor in Beijing area is estimated from the data of GPS/VAPOR experiment with high time resolution. We analyze the relation between regional atmospheric and local temperature, ground vapor pressure and precipitation. Precipitable water is well related with the ground water vapor pressure in clear day, but not well in cloudy or rainy day. An abrupt increase of regional atmospheric water vapor in a short time is often companied with precipitation, although the value of integrated precipitable water does not correspond to the amount of precipitation.

Key words: ground - based GPS; atmospheric water vapor; ground water vapor pressure