

地基 GPS 遥感观测安徽地区水汽特征

毕研盟 毛节泰 杨光林 李成才

(北京大学物理学院大气科学系,北京 100871)

摘要 对 2002 年 6~7 月安徽地区肥西、桐城、寿县、无为、芜湖、滁州 6 个 GPS 观测站的数据,结合相应的地面温度、气压等气象数据反演了时间间隔为 30 min 连续变化的水汽总量。这一解算结果由解算方法分析达到 1~2 mm 量级精度,达到了数值天气预报和气候研究的要求。利用这些资料,分析了上述地区水汽变化特征。单站水汽的持续积累和源源不断的水汽输送是强降水系统发生发展的必要条件,为了研究水汽来源及水汽量的大小,结合 NCEP 资料计算了一次强降雨过程中水汽通量值。

关键词 地基 GPS 水汽 遥感 水汽总量

引言

水汽在大气中所占的比例很小,仅 0.1%~3%,但却是大气中最不均匀最富于变化的成分,在天气演变与气候变化中扮演一个极为重要的角色。作为一种很重要的温室气体,影响地气系统的能量平衡,从而对气候产生影响;水汽在大气物理和大气化学诸多过程中起着关键作用,云的形成、降水的发生过程中水汽是关键因子。水汽总量的增加和水汽通量的辐合与对流发展密切相关,暴雨常形成于水汽通量随时急剧增加且水汽通量辐合梯度较大的区域^[1]。时间、空间分辨率高的水汽资料将提高中小尺度的数值天气预报精度^[2]。发展新的技术来探测地球大气中的水汽被确认为是一个很关键的领域^[3]。

水汽在对流层中时空分布很不均匀,靠近洋面水汽多,内陆少;低纬度水汽多,高纬度少。我国的平均水汽含量南方大,西北方小,愈深入内陆水汽含量愈小。水汽除了受季节、地理环境影响外,还受大尺度环流、中尺度天气系统和局地环境特征的影响,所以提高对水汽的监测能力十分重要。目前的探测手段有无线电探空仪、微波辐射计、卫星观测等。GPS 遥感观测水汽是近年来发展起来的一种新的水汽监测方法,具有上述常规方法无法比拟的优点^[4]:时间分

辨率高;精度高,无需校准,维护简单;不受降水和云的影响,全天候观测的能力等。为了深入研究我国南方长江流域梅雨锋暴雨发生发展的机理和中尺度强对流系统三维结构,细致了解水汽演变过程,从而提高暴雨的监测和预报能力,在 2002 年的 6~7 月份,北京大学与国家卫星气象中心联合在安徽进行了 GPS 外场的观测实验,在肥西、铜城、寿县、无为、芜湖、滁州设了 6 个 GPS 观测站。

1 原理和方法

Bevis 等^[5]提出了采用 GPS 技术探测大气水汽含量的原理,时间分辨率优于 30 min。毛节泰^[6]也对此法作过详细的讨论。基本原理基于大气电波传播延迟物理学,GPS 卫星发射带有时间标识的无线电信号,经大气层到达地面 GPS 接收机时,由于大气的影 响而产生延迟。可以将大气延迟划分为电离层延迟、静力延迟和湿项延迟。这种时间上的延迟等效于路径的增长,在天顶方向最小。令 ΔL 表示为对流层天顶方向的总延迟,有:

$$\Delta L = 10^{-6} \int_{\text{ante}}^{\text{sate}} N(z) dz \quad (1)$$

积分沿天顶方向(ante 表示天线,sate 表示卫星), N 为大气折射指数, $N = 10^6(n - 1)$, n 为大气折射

国家 863 项目 2002 AAI 35360 资助

作者简介:毕研盟,男,1979 年生,在读硕士研究生,E-mail: bym@pku.edu.cn

收稿日期:2003 年 9 月 5 日;定稿日期:2003 年 11 月 10 日

率, N 为大气温、湿压的函数, 可表达为:

$$N \cong 77.6 \frac{p}{T} + 3.73 \times 10^5 \left| \frac{e_w}{T^2} \right| \quad (2)$$

其中 p 为气压, e_w 为水汽分压, T 为温度 (K), 所以得:

$$\Delta L \cong 10^{-6} \int \left[77.6 \left| \frac{p}{T} \right| + 3.73 \times 10^5 \left| \frac{e_w}{T^2} \right| \right] dz \quad (3)$$

积分号里的第一项为流体静力学延迟 (或干延迟), 与气压有很好的相关。第二项称为天顶湿延迟, 用 Z_{WD} 表示。以 I_{WV} 表示 GPS 接收机上方垂直积分水汽, 则:

$$I_{WV} = \int \rho_w dz = \frac{1}{R_v} \int \frac{e_w}{T} dz \quad (4)$$

其中 ρ_w 为水汽密度, R_v 为水汽的比气体常数, 若以 P_W 表示气柱内所有水汽折算为液态水时的水柱高, 代表水汽积分总量, 则有:

$$P_W = \frac{1}{\rho} I_{WV} = \pi Z_{WD} \quad (5)$$

其中 ρ 为液水的密度, π 为比例常数, 与地面加权平均温度有关, 大约值 0.15, 即 1 cm 的 P_W 可引起大约 6.5 cm 的信号延迟, 精确的形式和数值可通过地面气温的观测和历史资料的统计而建立。

2 数据资料分析

取得了实验区 6 个观测站以及国内外部分 GPS 跟踪站的数据后, 结合相应的温度、气压等气象资料解算出了实验期间的水汽总量。

处理得到的各站数据情况统计表如表 1。

表 1 各站数据情况统计表

站点	坐标	海拔高度/m	记录天数	有效数据
肥西	31.56°N, 117.15°E	24.8	38	1824
桐城	30.89°N, 116.94°E	84.8	38	1824
寿县	32.38°N, 116.78°E	23.5	37	1776
芜湖	30.89°N, 118.57°E	32.3	30	1440
无为	31.13°N, 117.89°E	33.1	28	1344
滁州	32.13°N, 118.31°E	29.1	15	720

芜湖、无为、滁州 3 站因故数据记录不连续, 期间有中断。所以本文主要分析了肥西、桐城、寿县 3 站的 GPS 水汽资料特征。

3 结果分析

3.1 GPS 水汽总量变化特征

图 1 为肥西、寿县两站 GPS 反演出的大气总含水量变化曲线, 时间间隔为 30 min。

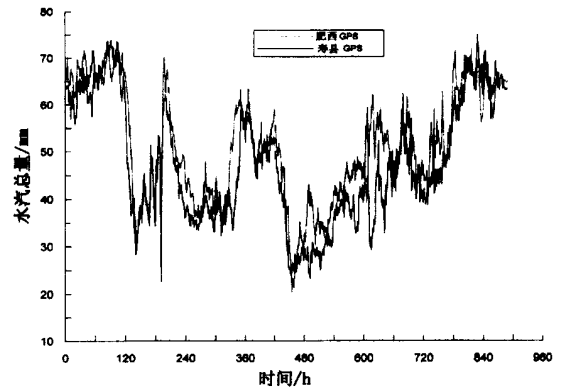


图 1 肥西、寿县 GPS 水汽时间序列

(从 2002 年 6 月 17 日 08:00 始)

从地理位置上来看, 寿县处于肥西的北面, 二者经度上差别不大。由图可以看出, 两地的水汽总量变化曲线比较一致, 这反映两地在同一天气系统的控制之下, 曲线变化不同的地方反映出水汽受局地环境影响。试验期间安徽地区处于夏季, 空气中的水汽量值较大, 变化也比较剧烈。水汽总量值出现周期性的上下波动, 观测开始时水汽处于高值区, 一段时间以后, 水汽值下降, 然后又迅速积累。肥西、寿县两地水汽最大值分别为 73.6 mm、75.11 mm; 最小值只有 20.37 mm、22.67 mm; 均值分别为 51.24 mm、47.38 mm。按照杨红梅^[7]等人的方法, 参照试验地区的降水情况, 根据气柱的水汽总量值把局地大气分为干燥型、中等型、湿型和高湿型 4 类。分析实验数据可以得到, 两地 6、7 月份常受湿型和高湿型大气控制, 湿型大气降雨可能性大, 通常有降水情况发生, 而高湿型大气易发生暴雨等灾害性天气现象。

由于我们的 GPS 观测站没有相应的探空资料, 取距离桐城站较近的安庆 (相距 45 km) 的探空资料作对比, 来验证由 GPS 反演得到的水汽的可信度。图 2 为桐城站 GPS 水汽总量与探空资料计算水汽的对比图, 同时给出了每小时地面降水资料。可以看出, GPS 水汽值与探空符合得较好。

实验期间内出现多次大的降水过程, 最大雨强出现在 6 月 25 日 16:00, 降水量为 44.3 mm。GPS 遥感出的大气水汽总量细致地反映了每一次天气过程中水汽量的变化情况, 暴雨启动前, 水汽量不断积累, 局地大气向湿型或高湿型大气转变。但水汽总量值与降水量的大小之间的关系比较复杂, 并不是一种简单的正比关系, 从图中可以看出, 有时大气中

的水汽总量值并不高,但降水却发生,这是因为降水来自云中的液态水,不是来自大气中的水汽总量。GPS 测得的是大气中总的含水量, Solheim^[8]等研究认为,作为一种全天候的观测方法,对云中的液态水是不敏感的。另一方面,水汽梯度值及天气系统作用维持时间也对降水量的大小有重要影响^[9]。因而水汽总量低值情况下也会有降水发生。

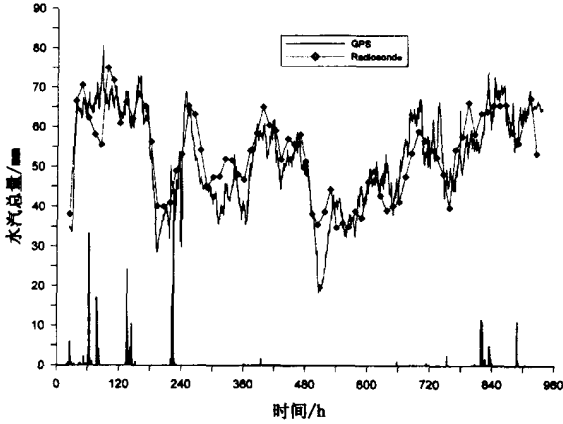


图 2 桐城站 GPS 水汽总量与探空水汽 地面降水 (图中下部黑线) 对照图 (2002 年 6 月 17 日 08:00 始)

3.2 水汽通量值的估算

水汽总是处于不停的变化之中,单站水汽的持续积累是降水启动的必要条件,水汽通量辐合梯度大的区域,常有暴雨发生。利用桐城站的 GPS 水汽值,结合 NCEP 资料对一次强降水过程发生时进入雨区的水汽通量值进行了估算。图 3 为桐城站 GPS 水汽值和由 NCEP 资料计算得到的水汽总量值的对照图。

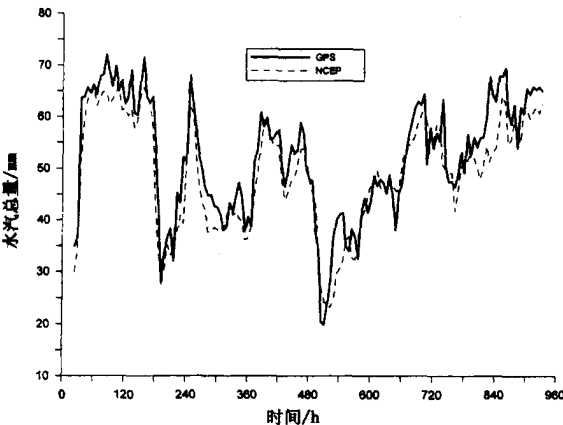


图 3 桐城站 GPS 与 NCEP 6 h 间隔水汽总量对照图 (从 2002 年 6 月 18 日 08:00 始)

采用的 NCEP 资料为每 6 h 一次,水平分辨率 $1^\circ \times 1^\circ$,垂直分辨率 50 hPa。选取与桐城站相近的点 ($117^\circ \text{E}, 31^\circ \text{N}$) 的资料进行对照。从图中可见,二者水汽总量曲线变化符合得较好。从散点图(图 4)来看,在所有相同的时刻(共 152 个数据点),NCEP 与 GPS 的相关系数为 0.93,均方差 0.50 cm,平均差(GPS 与 NCEP 之差)0.29 cm。NCEP 计算得到的水汽总量比 GPS 低 6%。

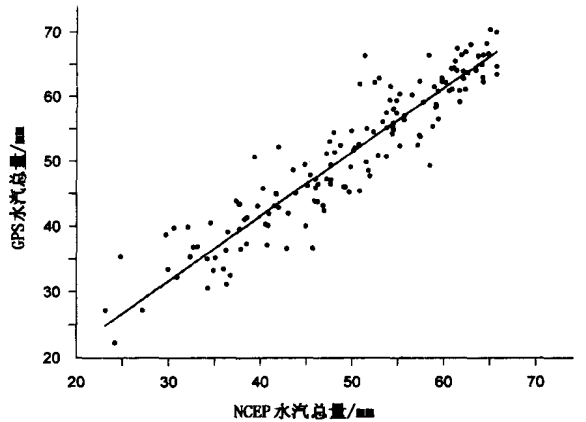


图 4 GPS 与 NCEP 水汽总量散点图

从图 2 中小时雨量资料上看,个别小时雨量达到或者超过了水汽总量,说明水汽的源源不断的水平输送是暴雨持续发展的必要条件。为了说明这一点和了解水汽的来源,我们选取桐城站第 3 次降水过程,第 219 到 226 h,即 6 月 25 日 11:00 到 6 月 25 日 18:00,区域水平大小 ($30.5^\circ \sim 31.5^\circ \text{N}, 116.5^\circ \sim 117.5^\circ \text{E}$),垂直方向从地面到 100 hPa,最大雨强 44.3 mm/h 发生在第 224 h(6 月 25 日 16:00)。用 GPS 测得的水汽总量值对 NCEP 计算的水汽总量值进行订正后,估算进入此区域的水汽通量 F :

$$F = F_u + F_v \tag{6}$$

$$F_v = - \frac{1}{g} \int_{p_s}^p q v d p \tag{7}$$

$$F_u = - \frac{1}{g} \int_{p_s}^p q u d p \tag{8}$$

式中 u, v 分别为纬向 经向的风速, p_s, p 分别为地面 气层顶的气压值, q 为比湿, g 为重力加速度。表 2 为 2002 年 6 月 25 日 14:00(世界时 06:00) 通过各个边界面的水汽通量。

表 2 通过各边界的水汽通量 10^6 kg/s

东边界	南边界	西边界	北边界	总和
- 4.90924	6.36018	5.77953	- 7.11305	0.117419

由表 2 可见,水汽主要从南边界和西边界流入,东边界、北边界则为流出,水汽输送沿 SW—NE 方向,流入选定区域的水汽净输入量为 $0.117419 \times 10^6 \text{ kg/s}$,以降水的形式释放。

4 结论

本文通过对 2002 年 6~7 月长江流域 GPS 观测站点的数据,结合地面气象资料,得到每半小时一次的大气水汽总量。大气水汽总量的时间变化序列和天气过程特别是降水过程有密切的关系,GPS 描述的水汽变化细节,对于中小尺度的天气系统分析和数值预报有重要的价值。单站水汽的水平输送是暴雨得以发展的前提,结合 NCEP 资料给出了一个强降水发生前进入观测区域的水汽量大小,表明水汽来源于西南方向,向东北方向输送。

GPS 遥感水汽总量为大气科学研究提供了一种新的监测手段,布网观测可以提供高时空分辨率、高精度的水汽数据资料,无论是对气候研究还是天气预报都有重要价值。

参考文献

1 李成才,毛节泰. GPS 地基遥感大气水汽总量分析. 应用气象学

报,1998,9(3):470-477

- Baker H C, Dodson A H, Penna N T, et al. Ground-based GPS water vapour estimation: Potential for meteorological forecasting. *Journal of Atmospheric and Solar-terrestrial Physics*, 2001, 63: 1305-1314
- Braun J, Rocken C, Liljegen J. Comparisons of line-of-sight water vapor observations using the Global Positioning System and a pointing microwave radiometer. *J. Atmos. Ocean. Technol.*, 2003, 20: 606-612
- Wolfe D E, Gutman S I. Developing an operational, surface-based, GPS, water vapor observing system for NOAA: Network design and results. *J. Atmos. Ocean. Technol.*, 2000, 17: 426-440
- Bevis M, Businger S, Herring T A, et al. GPS meteorology: Remote sensing of atmospheric water vapor using the global position system. *J. Geophys. Res.*, 1992, 97: 15787-15801
- 毛节泰. GPS 的气象应用. *气象科技*, 1993, 4: 45-49
- 杨红梅,何平,徐宝祥. 用 GPS 资料分析华南暴雨的水汽特征. *气象*, 2002, 28(5): 17-21
- Solheim F S. Propagation delays induced in GPS signals by dry air, water vapor, hydrometeors and other atmospheric particulates. *J. Geophys. Res.*, 1999, 104: 9663-9670
- 杨光林,刘晶森,毛节泰. 西藏地区水汽 GPS 遥感分析. *气象科技*, 2002, 30(5): 266-272
- 胡国权,丁一汇. 1991 年江淮暴雨时期的能量和水汽循环研究. *气象学报*, 2003, 61(2): 146-163
- 蔡应,钱正安,宋敏红. 华北和西北区干湿年间水汽场及东亚夏季风的对比分析. *高原气象*, 2003, 29(2): 14-23

Remote Sensing of Atmospheric Water Vapor Characteristics in Anhui Province Using Ground Based GPS

Bi Yanmeng Mao Jietai Yang Guanglin Li Chengcai

(Department of Atmospheric Sciences, Peking University, Beijing 100871)

Abstract: Using GPS data from six sites in Feixi, Tongcheng, Shouxian, Wuwei, Wuhu, and Chuzhou from June to July 2002, estimation was conducted on the continuous atmospheric precipitable water (PW) with a temporal resolution of 30 min. The temperature and air pressure data from above six sites were used. The accuracy of the deduced PW results is 1-2 mm, acquired by the analytical method, sufficient for weather forecasting and climate researches. The characteristics of water vapor in these areas were analyzed by means of the results. The durative accumulation and continuous transport of water vapor are the necessary conditions of formation and development of severe storms. In order to better understand where vapor come from and what is the vapor amount, the water vapor flux was estimated in combination with NCEP data during a severe storm case.

Key words: ground-based GPS, water vapor, remote sensing, precipitable water