

# 中尺度数值预报模式预报水汽与 GPS观测的比较研究<sup>\*</sup>

袁招洪<sup>1,2)</sup> 丁金才<sup>3)</sup> 陈永林<sup>3)</sup>

1) (南京气象学院, 南京 210044)

2) (上海市气象局, 上海 200030)

3) (上海中心气象台, 上海 200030)

**摘要** 利用建立在长江三角洲地区的GPS观测网中4个站点资料,进行2002年梅雨期(6月18日~7月11日)MM5模式24小时预报结果与GPS观测资料的比较研究。研究表明:2002年梅雨期,不同的GPS站点可降水量的变化与梅雨带的移动和走向有直接的关系。提高模式分辨率能减小模式初始场对湿度的分析误差,但对可降水量的预报能力改善不明显。尽管MM5模式积分一开始对降水量的预报就存在5%~10%的偏差,但积分前10小时模式对可降水量表现了较好的预报能力。积分20小时后,模式对降水量的预报偏差明显增长。研究还表明:GPS对降水量的测量与探空观测有较高的一致性。相距43 km时,两者仍有一定的可比性。GPS测量的可降水量资料可能存在系统误差,同化GPS资料时应关注GPS资料本身的可靠性。

**关键词:** GPS; 中尺度数值预报模式; 可降水量

**文章编号** 1006-9895 (2004) 03-0433-08 **中图分类号** P435 **文献标识码** A

## 1 引言

水汽是一种重要的大气成分,其相态变化及相态变化时所伴随潜热转化使得水汽在各种尺度的大气过程中发挥着重要的作用。缺少精确、连续的水汽资料是数值预报模式短时降水预报产生偏差的主要原因之一<sup>[1]</sup>。由于GPS观测不受天气条件变化的影响,能以较高的精度全天候测量水汽,且运行成本很低,使精确、连续地对大气水汽进行监测成为可能。研究表明GPS测量的可降水量(PW)资料能改善对暴雨系统的分析<sup>[2]</sup>,通过将表面湿度和PW资料同化入中尺度模式能改善模式对水汽垂直结构和短期降水预报<sup>[3]</sup>。20世纪90年代中期以来,我国在GPS气象学研究方面取得了明显的进展,从GPS测量大气水汽的原理、算法、误差分析和订正等方面进行了深入的探讨<sup>[4~6]</sup>,并且随1998年华南暴雨试验和海峡两岸及邻近地区暴雨试验(HUAMEX)中GPS测量技术使用,已通过对GPS测量的大气可降水量的分析揭示了大气水汽与天气系统变化的初步规律<sup>[7,8]</sup>。GPS资料在大气科学研究领域有着广泛的应用前景。

作为GPS观测资料同化入数值预报模式的前期工作,本文利用建立在长江三角洲地区的GPS观测网(14个站点)中4个站点的资料,将2002年梅雨期(6月18日~7

月 11 日) MM5 模式预报结果与之进行比较, 以可降水量的形式检验 MM5 模式对大气水汽的预报能力, 同时利用上海宝山探空站和江苏南京探空站资料对 GPS 资料进行了验证。

## 2 试验资料及计算方法

### 2.1 GPS 资料

GPS 卫星发射的信号在穿越大气过程中, 由于大气折射率的变化使其相对于在真空中直线传输而言出现了延迟。地基 GPS 接收机在同时接收 6~8 颗 GPS 卫星发射的双频信号后可定量获得接收机上空的延迟量 (称天顶延迟)。天顶延迟 ( $Z_{TD}$ ) 由静力延迟 ( $Z_{HD}$ ) 和湿延迟 ( $Z_{WD}$ ) 组成, 即

$$Z_{TD} = Z_{HD} + Z_{WD}. \quad (1)$$

Elgered 等<sup>[9]</sup>采用了下式估计静力延迟:

$$Z_{HD} = \frac{(2.2779 \pm 0.0024)p_s}{f(\lambda, H)} \quad (2)$$

其中,  $p_s$  为地面气压 (hPa),  $f(\lambda, H)$  为重力加速度随纬度  $\lambda$  和椭圆地球表面上高度  $H$  的变化, 其计算式为

$$f(\lambda, H) = (1 - 0.00266\cos 2\lambda - 0.00028H). \quad (3)$$

因此, 在测得地面气压  $p_s$  和 GPS 接收机纬度和高度已知时可求出静力延迟。根据 (1) 式, 天顶延迟 ( $Z_{TD}$ ) 减去静力延迟 ( $Z_{HD}$ ) 后, 可求出湿延迟 ( $Z_{WD}$ )。从而, 可反演出 GPS 接收机上空的累计可降水量 (简称可降水量)。

Bevis 等<sup>[10]</sup>给出了由湿延迟转化为降水量的公式, 即

$$P = \Pi \times Z_{WD}, \quad (4)$$

其中,

$$\Pi = \frac{10^8}{\rho_w R_v [(k_3/T_m) + k'_2]}, \quad (5)$$

其中,  $\rho_w$  为液态水的密度 (单位:  $\text{kg m}^{-3}$ ),  $R_v$  是水汽气体常数 (单位:  $\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$ ),  $T_m$  为水汽压权重的平均温度,

$$T_m = \frac{\int (p_w/T) dz}{\int (p_w/T^2) dz}. \quad (6)$$

我们采用经验公式  $T_m = 70.2 + 0.72T_s$ <sup>[11]</sup>, 计算 GPS 站点上空水汽压权重的平均温度, 其中  $T_s$  为 GPS 接收天线处的温度。

本试验利用长江三角洲地区 GPS 观测网 (14 个站点) 中浙江舟山、上海浦东、安徽马鞍山和江苏东台 4 个 GPS 站点资料, 进行中尺度数值模式预报可降水量与 GPS 观测的比较试验 (站点位置见图 1)。该 GPS 系统为 ASTECH 双频 GPS 接收机, GPS 资料收集后, 利用 GAMIT 软件进行天顶延迟和其他参数的计算。在实际应用中, 每半小时计算一次可降水量供研究和业务使用。

### 2.2 MM5 模式模拟资料

本试验选用 MM5 中尺度数值预报模式<sup>[12]</sup>作为试验模式。模式垂直 27 层, 双重嵌

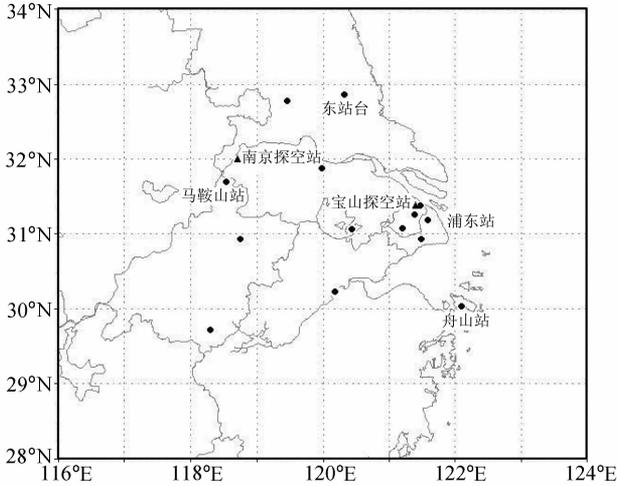


图1 模式细网格覆盖区域和 GPS 站点、探空站位置  
黑圆点：GPS 站点；黑三角：探空站

套，网格距分别为 45 km 和 15 km，水平格点数分别为  $87 \times 95$  和  $52 \times 62$ 。细网格覆盖了长江三角洲地区 GPS 观测网的 14 个站点（图 1）。模式湿物理过程采用包含冰相过程的混合项（Mix phase）参数化方案，积云参数化方案选用 Grell 方案，大气辐射采用云（Cloud）辐射参数化方案。模式粗网格积分时间步长为 120 s。

将 NCEP 的 AVN 全球模式客观分析场作为 MM5 初值场，利用 Cressman 分析方法将每日 20 时常规地面、高空观测资料对初值场进行客观分析后形成 MM5 模式初始场。模式积分 24 小时，每小时输出预报结果。直接利用 MM5 模式输出的水汽混合比  $q$  计算垂直累积可降水量，即

$$P_u = \int q / (\rho_v \times g) dp, \quad (7)$$

其中， $\rho_v$  为水汽密度， $g$  为重力加速度， $p$  为气压。

试验中，首先利用（7）式计算 GPS 站点周围 4 个格点上的可降水量，然后将格点上的可降水量双线性内插至 GPS 站点，以获得 GPS 站点逐时次可降水量预报值。

### 2.3 探空加密资料

为验证梅雨期 GPS 测量降水量的精度，我们在上海宝山和江苏南京进行了探空加密观测（站点见图 1）。探空观测由一天 2 次（08 时和 20 时）增加到 4 次（02 时、08 时、14 时和 20 时）。由于探空仪对湿度的观测往往低于 100 hPa，而 GPS 测量的可降水量为整层大气中的可降水量，因此探空仪对水汽的观测与 GPS 测量之间存在空间误差。为了解由于该空间差而引起可降水量测量偏差的大小，我们采用了 5 种被广泛使用的标准大气廓线计算 100 hPa 以上的可降水量。这 5 种大气廓线分别为热带、中纬度夏季、中纬度冬季、高纬夏季和高纬冬季大气廓线。计算后发现 100 hPa 以上总可降水量分别占总降水量的 0.019%、0.027%、0.1%、0.04% 和 0.2%。因此，试验中忽略 100 hPa 以上的可降水量对试验结果的影响。

### 3 试验结果

图 2 是浙江舟山、上海浦东、安徽马鞍山和江苏东台 4 个测站梅雨期可降水量的变化图，由图可以看出：在整个梅雨过程中，长江三角洲地区南北、东西可降水量的差异较大。入梅后各站可降水量明显增加，出梅时可降水量逐步减小。在梅雨初期，

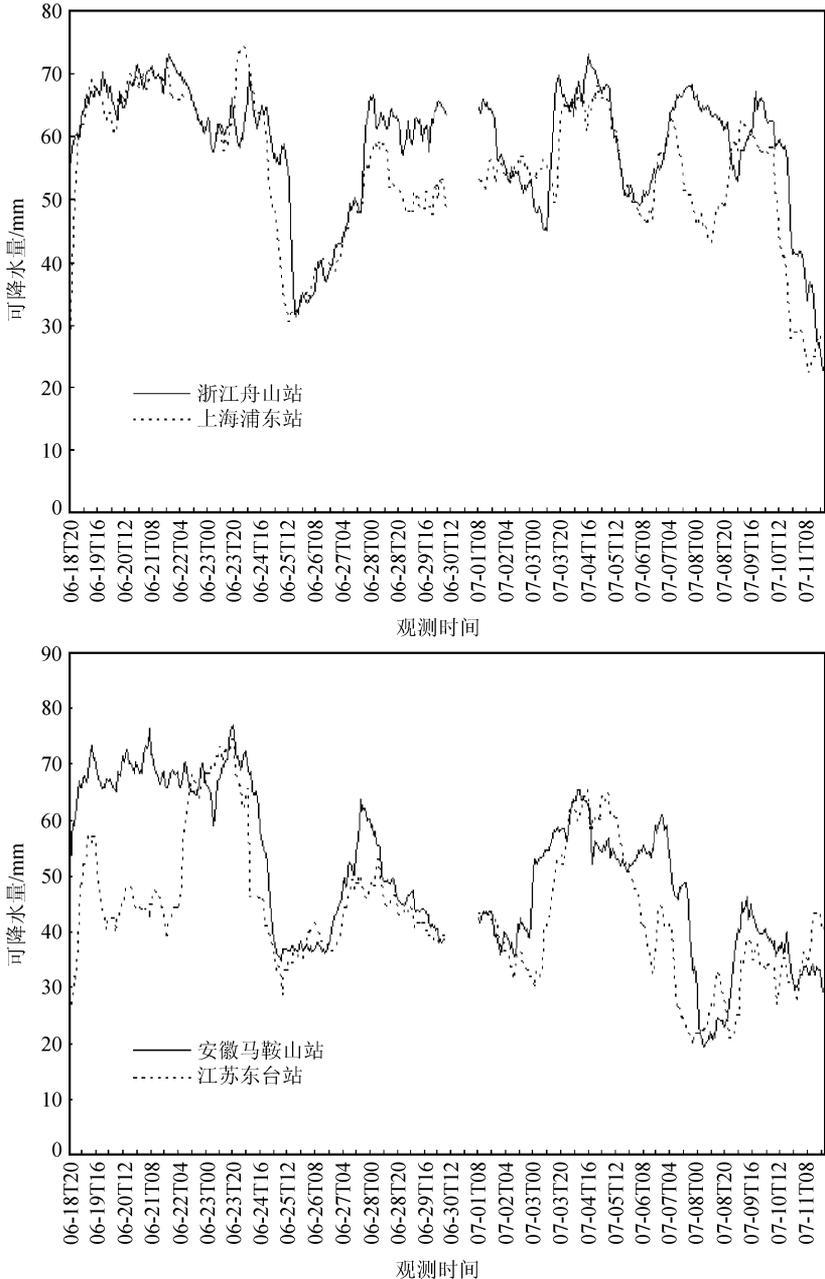


图 2 梅雨期间 GPS 测量的可降水量随时间的变化

除位于江苏北部的东台测站外，其他测站湿度很大，基本都超过了 60 mm，最大达 73.4 mm。4 个测站在 6 月 25 日左右出现了 35 mm 的可降水量低值过程。其后，可降水量分布不均，基本上南部测站测得的可降水量大于北部，东部大于西部，这主要与梅雨带的移动和走向有关。由于受第五号台风的影响，7 月 4 日各测站的可降水量普遍较大。台风过后，东南测站测得的可降水量大于西北测站。整个梅雨期，4 个站点可降水量变化的差异表明长江三角洲地区湿度分布不均匀、且变化较大，这与梅雨带的移动和走向有直接的关系。

### 3.1 模式初始场计算的可降水量与 GPS 观测的比较

为了比较梅雨期 MM5 模式粗、细网格初始场对湿度的描述能力，我们利用浙江舟山、上海浦东、江苏东台和安徽马鞍山 4 个 GPS 站点可降水量测量值与模式粗、细网格初始场（20 时）可降水量计算值进行了比较。与 GPS 测量值相比，4 个站点模式细网格初始场降水量的平均偏差分别为 1.92 mm、0.76 mm、2.3 mm 和 -2.14 mm，其均方根分别为 4.33 mm、3.05 mm、3.9 mm、4.4 mm，模式初始场可降水量与 GPS 测量值之间的相关系数分别为 0.941、0.971、0.963 和 0.904。模式粗网格初始场在上述 4 个站点降水量的平均偏差分别为 2.51 mm、1.94 mm、2.56 mm、-1.73 mm，其均方根为 4.64 mm、3.21 mm、3.85 mm、4.9 mm，模式初始场可降水量与 GPS 测量值之间的相关系数分别为 0.934、0.967、0.964 和 0.884。总体上，模式细网格对湿度场的描述偏差要小于粗网格，这说明提高模式分辨率可以改善模式对湿度场的描述。

### 3.2 模式预报可降水量与 GPS 观测值的比较

对模式预报的可降水量与 GPS 测量值进行比较可以发现：在梅雨期，模式 24 小时滚动预报基本能反映出 4 个站点降水量的日变化趋势。由于模式对降水过程预报存在提前和滞后的偏差，使得模式对可降水量逐时次变化的预报也同样存在提前和滞后现象（如图 3 所示）。平均而言，模式对降水量的预报一开始就存在 5%~10% 的相对偏差（绝对偏差与 GPS 测量值之比）。在积分前 10 小时，虽然模式预报降水量的相对偏差有一定的变化，但其大小与模式积分开始时的相对偏差基本接近，这说明 MM5 模式前 10 小时对可降水量有较好的预报能力。模式积分 20 小时后，可降水量预报相对偏差明显增大，表明 MM5 模式 20 小时后对可降水量预报能力明显减弱。模式粗、细网格预报的可降水量与江苏东台、上海浦东、安徽马鞍山、浙江舟山 4 个 GPS 测站测量值之间的相关系数分别为 0.891、0.941、0.947、0.921 和 0.902、0.947、0.939、0.911。表明模式粗、细网格对可降水量预报能力基本接近，模式水平分辨率的提高并未明显增加模式对降水量的预报能力。模式对降水量的预报偏差与模式初始场对湿度的分析偏差有直接的关系，改善模式初始湿度场的分析也许是改善模式预报的有效途径。

### 3.3 GPS 测量与探空资料观测的比较

为验证梅雨期 GPS 测量降水量的精度，我们以上海宝山为例进行 GPS 测量值与探空资料的比较（上海宝山 GPS 测站与探空站之间距离约为 2 km）。如图 4 所示，上海宝山测站可降水量 GPS 测量值与探空资料计算值两者有较高的一致性。GPS 测量比探空观测平均偏高 0.07 mm，两者之间偏差绝对值的平均为 1.86 mm，偏差的标准偏差 2.48 mm。因此，GPS 测量的可降水量有很好的代表性。

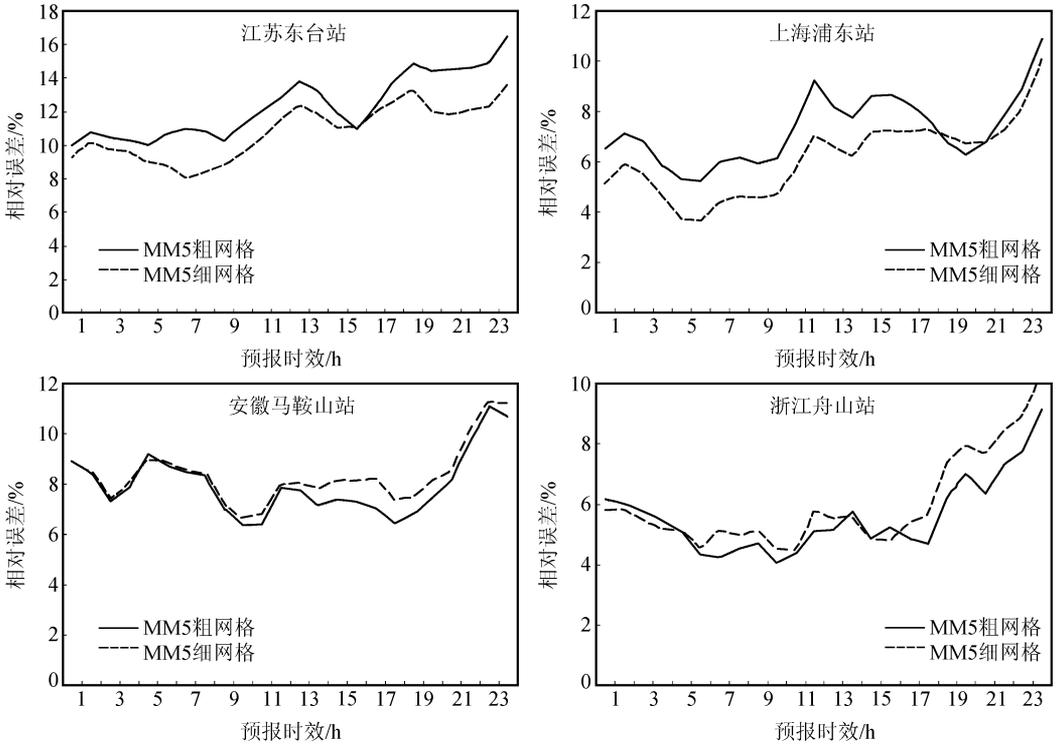


图 3 模式预报的可降水量与 GPS 测量相对偏差的比较

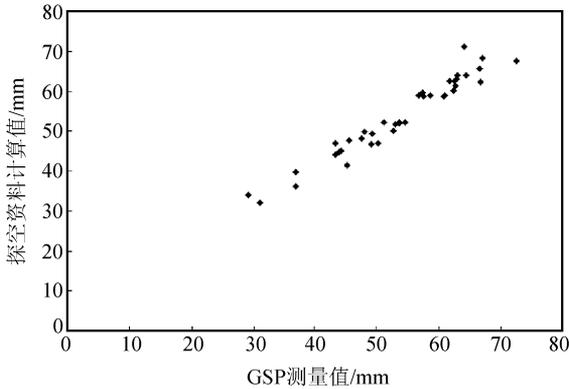


图 4 上海宝山站可降水量 GPS 测量值与探空资料计算值的比较

表 1 给出了梅雨期间上海宝山和江苏南京探空站与周围不同距离 GPS 测站测量结果的比较。很明显，随 GPS 站点与探空站之间距离的增加，两者测量可降水量的偏差逐步增加。同样，两者间的相关系数也随距离增加而减小，如两者相距 2.06 km 时，相关系数为 0.97，距离为 104.16km 时相关系数降为 0.66。GPS 站点在距离探空站 43.49 km 时，相关系数也达 0.93，其资料仍有较好的可比性。值得注意的是浦东站的情况，相关系数为 0.96，而偏差却达 4.48 mm，且绝对偏差为 4.76 mm，说明在该站点 GPS 测量值可能存在系统偏差。由于浦东站离宝山探空站的距离仅为 22.26 km，该

系统偏差可能是由于天气系统的差异引起，但也可能是由于 GPS 仪器本身造成的。因此，在进行 GPS 资料订正模式初始场湿度分布时，GPS 测量值的影响范围选在 50 km 以下较为合适，且要考虑 GPS 资料本身的可靠性。

表 1 不同距离 GPS 测量与探空资料的比较

| 探空站              | 上海宝山探空站 |       |       |        | 江苏南京探空站 |
|------------------|---------|-------|-------|--------|---------|
|                  | 宝山站     | 浦东站   | 佘山站   | 东山站    | 马鞍山站    |
| GPS 站点与探空站的距离/km | 2.06    | 22.26 | 43.49 | 104.16 | 42.67   |
| 平均偏差/mm          | 0.07    | 4.48  | -1.29 | -7.28  | 1.69    |
| 平均绝对偏差/mm        | 1.86    | 4.76  | 3.09  | 9.65   | 3.58    |
| 偏差均方根/mm         | 2.48    | 3.30  | 3.85  | 9.57   | 4.16    |
| 绝对偏差均方根/mm       | 1.56    | 2.88  | 2.61  | 7.14   | 2.68    |
| 平均相对偏差/%         | -0.03   | 9.0   | -2.18 | -13.36 | 2.78    |
| 相关系数             | 0.97    | 0.96  | 0.93  | 0.66   | 0.93    |

## 4 结论

(1) GPS 是一种监测可降水量变化的有效手段，连续的 GPS 测量能较好地确定降水量的时空分布。2002 年梅雨期，不同的 GPS 站点降水量的变化与梅雨带的移动和走向有直接的关系。

(2) 模式初始场对湿度分布的分析存在一定误差，提高模式分辨率能减小该分析误差。模式 24 小时滚动预报基本能反映出降水量的日变化趋势，而对可降水量逐时次变化的预报存在提前和滞后的现象。MM5 模式粗、细网格对可降水量预报能力基本接近，模式水平分辨率的提高并未明显增加模式对降水量的预报能力。

(3) MM5 模式积分一开始对降水量的预报就存在 5%~10% 偏差。尽管如此，模式积分前 10 小时对可降水量表现了较好的预报能力。积分 20 小时后，模式预报偏差明显增长。进一步提高模式预报精度须对模式初始湿度场进行订正。

(4) GPS 测量与探空观测有较高的一致性，平均偏差绝对值为 1.86 mm。随 GPS 站点与探空站之间距离的增加，GPS 测量与探空观测的可比性逐步减小。在相距 43 km 时两者仍有一定的可比性。GPS 测量的可降水量资料可能存在系统误差，在将 GPS 资料同化入数值预报模式时应关注 GPS 资料本身的可靠性。

## 参 考 文 献

- 1 Kuo, Y.-H., Guo Yongrun, and E. R. Westwater, Assimilation of precipitable water vapor into mesoscale numerical model, *Mon. Wea. Rev.*, 1993, **121**, 1215~1238.
- 2 Rocken, C., T. Van Hove, J. Johnson et al., GPS storm—GPS sensing of atmospheric water vapor for meteorology, *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 1995, **12**, 468~478.
- 3 Kuo, Y.-H., X. Zou, and Guo Yongrun, Variational assimilation of precipitable water using a nonhydrostatic mesoscale adjoint model, *Mon. Wea. Rev.*, 1996, **124**, 122~147.
- 4 陈洪滨、吕达仁，GPS 测量中的大气路径延迟订正，测绘学报，1996，**25** (2)，127~132.
- 5 李成才、毛节泰，GPS 地基遥感大气水汽分析，应用气象学报，1998，**9** (4)，470~477.
- 6 李延兴、徐宝祥、胡新康等，用地基 GPS 观测站遥测大气含水量和可降雨量的理论基础与试验结果，中国科

- 学 (A 辑), 2000, **30**, 107~110.
- 7 杨红梅、徐宝祥、周秀骥, GPS 资料在天气分析中的应用, 气象科技, 2000, **4**, 32~37.
- 8 何平、徐宝祥、周秀骥等, 地基 GPS 反演大气水汽总量的初步实验, 应用气象学报, 2002, **13** (2), 179~183.
- 9 Elgered, G., J. L. Davis, T. A. Herring et al., Geodesy by radio interferometry: Water vapor radiometry for estimation of the wet delay, *J. Geophys. Res.*, 1991, **96**, 6541~6555.
- 10 Bevis, M., S. Businger, S. R. Chiswell et al., GPS meteorology: Mapping zenith wet delays onto precipitable water, *J. Appl. Meteor.*, 1994, **33**, 379~386.
- 11 Bevis, M., S. Businger, T. A. Herring et al., GPS meteorology: Remote sensing of atmospheric water vapor using the global positioning system, *J. Geophys. Res.*, 1992, **97**, 15787~15801.
- 12 Grell, G. A., J. Dudhia, and D. R. Stauffer, A Description of the Fifth-Generation Penn State/NCAR Mesoscale Model (MM5). NCAR Tech. Note NCAR/TN-398+STR, 1995, 122pp.

## A Comparison Study of Precipitable Water Simulated by NWP and GPS Observations

Yuan Zhaohong<sup>1,2)</sup>, Ding Jincai<sup>3)</sup>, and Chen Yonglin<sup>3)</sup>

1) (*Nanjing Institute of Meteorology, Nanjing 210044*)

2) (*Shanghai Meteorological Bureau, Shanghai 200030*)

3) (*Shanghai Weather Center, Shanghai 200030*)

**Abstract** Based on the GPS data at 4 sites of GPS networks in the Yangtze delta over the Meiyu period of 2002 (June 18~July 11), precipitable water (PW) evaluated by MM5 24h-simulation is compared with GPS observation to validate the ability of MM5 to simulate water vapor as depicted by PW. The results show that PW features observed at GPS sites directly relate to the movement and position of the Meiyu band during Meiyu period. The humidity error of MM5 reanalysis fields can be minimized by increasing the horizontal resolution of the model, but it has a little positive impact on PW prediction. Although a 5%~10% relative bias is found from the beginning of simulation, MM5 has a ability in PW prediction over 1h~10h integration period with the PW prediction error increasing obviously after 20h integration. It is also found that the bias of PW between GPS observations and radiosondes is small. GPS data is comparable to radiosondes even if GPS site is 43 Km far from radiosonde site. The quality of GPS data must be considered before the data is fed into NWP model because it may have systematic errors.

**Key words:** GPS; mesoscale numerical prediction model; participatable water; comparison