

GPS 观测资料应用于中尺度数值 预报模式的初步研究*

袁招洪

(上海市气象局, 上海, 200030; 南京气象学院, 南京, 210044)

金才

陈敏

(上海中心气象台, 上海, 200030)

(上海浦东新区气象中心, 上海, 200235)

摘 要

利用建立在长江三角洲地区 GPS 观测网中 11 个站点的可降水量资料, 对 2002 年 6 月 23~24 日影响长江三角洲地区的降水过程进行了 MM5 模式初始湿度场调整和 Nudging 同化试验。试验表明: 利用 GPS 测量的可降水量对模式初始湿度场进行调整能明显增强模式初始场描述水汽分布的能力, 从而有效地控制模式积分初期对可降水量预报的误差, 并对模式 6 h 累积降水量预报有较明显的改善作用。利用 Nudging 技术同化 GPS 可降水量资料对 MM5 预报效果改善较小, 并且 Nudging 系数的增加对预报效果的影响不大。总体上, 利用 GPS 可降水量资料调整模式初始湿度场对模式 6 h 累积降水预报效果的改善明显好于连续 Nudging 同化。试验还表明: GPS 资料对模式初始湿度场调整改善模式对累积降水量的预报主要是通过改善网格降水预报来实现的, 而 Nudging 同化主要是通过改善次网格降水而提高模式降水预报能力的。

关键词: GPS, 可降水量, 同化, 中尺度数值预报模式。

1 引 言

近年来, 中尺度数值模式已在日常天气预报和研究中发挥了重要作用。然而, 由于模式初始场存在误差和模式对大气物理过程的描述还不完善, 使得进一步提高中尺度数值模式的预报精度问题变得十分复杂。为了改善模式预报效果, 随着遥感技术发展而获得的各种遥感资料和相应的同化技术得到了广泛应用, 其中 GPS 测量的可降水量资料在数值预报中的应用是近年来发展较快的研究领域。

水汽是一种重要的大气成分, 在地球水循环中发挥着关键的作用—尤其与雷暴等局地天气的发生和发展有密切的关系^[1, 2]。由于水汽的蒸发、凝结、平流和云的形成、消散过程十分复杂, 目前依然利用站点稀疏、观测时次少(每日 08 和 20 时两次观测)的探空观测测量大气中的水汽, 使得我们对水汽分布及其变化的了解仍不充分, 尤其是在尺度较小的天气过程发生时, 对水汽的精确分析变得十分困难。

近几年得到广泛应用的 GPS 资料为进一步改善水汽分布的分析提供了可能。地基 GPS 接收机能测定其上空的可降水量, 且测量的精度较高^[3, 4]。这种观测方式不受天气条件和时间的限制, 维持费用较低, 能自动、连续地进行水汽测量, 是对传统湿度探测有益的补充。由稠密的 GPS 观测网测量的可降水量能提供验证中尺度模式有价值的附加信息^[5, 6], GPS 测量可降水量在气象业务中有广泛的应用前景, 且已进入实时应用阶段^[7, 8]。许多研究已经证明将可降水量同化入数值预报模式以改善湿度场的分析可提高模式的预报能力, 尤其使模式提供更精确的短期降水和云覆盖的预报^[9~13]。因此, 将 GPS 测量的可降水量资料用于数值预报研究是一项有意义的工作。

本文利用建立在长江三角洲地区的 GPS 观测网中 11 个站点的资料, 针对 2002 年 6 月 23~24 日影响长江三角洲地区的天气过程, 以 MM5 中尺度数值预报模式为试验模式, 进行了 GPS 测量的可降

* 初稿时间: 2003 年 6 月 9 日; 修改稿时间: 2003 年 8 月 20 日。

资助课题: 中国科学院知识创新工程重要方向项目(KJ CX2-SW-TF-3)。

水量调整模式初始湿度场中湿度的分布和利用 Nudging 技术将可降水量同化应用于 MM5 模式的试验,并初步分析和讨论了利用 GPS 测量的可降水量资料对 MM5 模式预报性能的改善程度。

2 降水过程描述

2002 年 6 月 23~24 日的强降水过程影响长江三角洲地区时正值梅雨期。随副热带高压的不断加强与华南雨带的北跳,长江三角洲地区于 6 月 19 日进入梅雨期。梅雨带在长江流域稳定维持 3 d 后逐步北抬至淮河流域,25 日又南落至长江流域。在梅

雨带南落的过程中,伴随着地面静止锋上低压的活动,6 月 23~24 日长江三角洲地区产生了局部暴雨。如图 1a 所示,沿长江一线 24 h 累积雨量有多个自动雨量站所测降水超过 50 mm,尤其是江苏启东、南通和上海崇明附近累积降水量分别为 83, 80 和 77 mm,而这些降水主要是在 6 月 23 日 20 时~24 日 02 时之间产生的,3 站 6 h 累积降水量分别为 69, 78 和 75 mm(如图 1b 所示)。因此,本文将图 1 所示的区域作为试验目标区域,并着重前 6 h 降水过程的数值模拟试验。

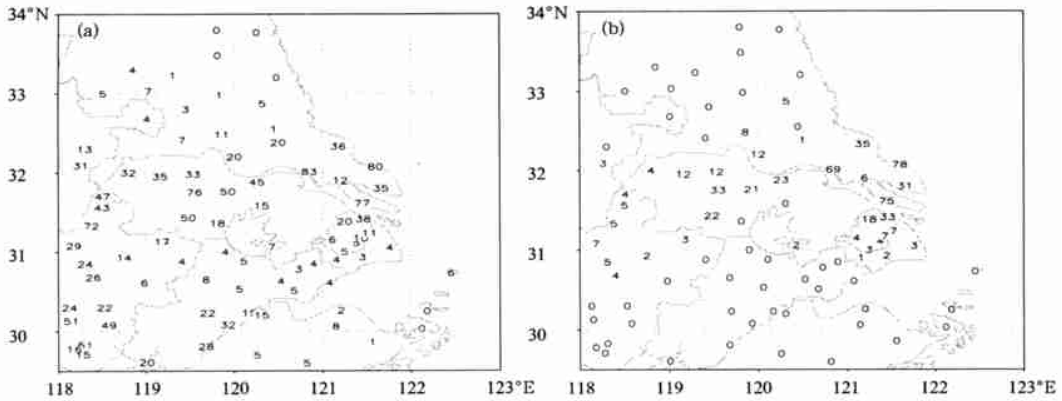


图 1 2002 年 6 月 23~24 日长江三角洲地区累积降水分布图

(a. 24 h 累积降水, b. 6 h 累积降水)

Fig. 1 Distribution of (a) 24 h accumulative Rainfall from 1200 UTC 23 to 1200 UTC 24 July 2002 and

(b) 6 h accumulative Rainfall from 1200 UTC to 1800 UTC 23 July 2002 over Yangtze delta

3 试验资料

3.1 GPS 资料

GPS 系统发射两种频率(1.2 和 1.6 GHz)测距信号可估计出接收机上空由于大气的存在而使 GPS 信号产生的延迟量。该延迟量由静力延迟和湿延迟两部分组成。静力延迟与大气的所有组成成分有关,可通过测量 GPS 接收天线处的气压精确地计算出来。湿延迟是由于水汽分子的偶极矩对 GPS 信号的作用而产生的,几乎与信号传输途径中累计水汽量成正比。利用地面温度估计出 GPS 接收机上空的平均温度后,可将湿延迟精确地反演出 GPS 接收机天线上空的累计水汽量,即可降水量^[4]。

长江三角洲地区 GPS 观测网中安装的 GPS 系统为 ASTECH 双频接收机,各站 GPS 资料收集后,利用 GAMIT 软件进行累计可降水量和其他参数的计算(站点位置见图 2)。通过 2002 年梅雨期间上

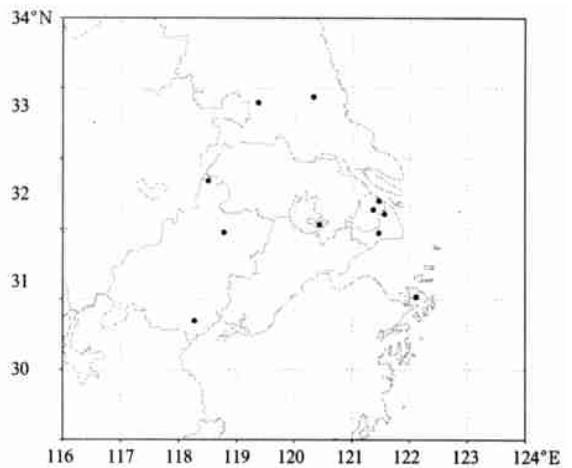


图 2 模式细网格覆盖区域和 GPS 站点

(图中黑圆点)示意图

Fig. 2 The region covered by MM5 domain 2 and

sites of GPS networks

(dot is the location of GPS station)

海宝山 GPS 测站测量可降水量与上海宝山气象站探空测量比较(两站相距 2 km), 两者平均绝对偏差为 1.86 mm, 表明 GPS 测量的可降水量具有较高的精度。在实际应用中, 每 0.5 h 收集一次 GPS 观测资料用于计算可降水量供研究和业务使用。

3.2 气象观测资料

本试验的目标区域为建立 GPS 观测网的长江三角洲地区。在目标区域所用的气象资料包括 85 个自动雨量站和 20 个地面气象站的观测资料。自动雨量站收集每小时的累计雨量, 地面观测站每 3 h 进行地面温度、露点、气压、风向、风速等气象要素的观测。

4 试验方法

4.1 模式和试验设置

本试验选用 MM5^[14] 模式作为试验模式。模式双重嵌套、垂直 27 层, 水平网格距分别为 45 和 15 km, 格点数分别为 87×95 和 52×62 。模式细网格覆盖了整个 GPS 观测网(如图 2 所示)。模式显式

表 1 试验名称和设置描述

Table 1 Summary of experiment design

试验名称	试验描述
CONTROL	无初始湿度场调整; 无资料同化
ANALYSIS	利用 GPS 可降水量资料调整模式初始湿度场, 无资料同化, 模式其他参数同 CONTROL
FDPA_GPS1	GPS 可降水量资料反演水汽混合比(q), 连续 6 h 的 Nudging 同化, Nudging 系数为 5×10^{-4} , 时间窗为 40 min, 影响半径为 90 km。模式其他参数同 CONTROL
FDPA_GPS2	除 Nudging 系数为 5×10^{-1} , 其他同 FDPA_GPS1。模式其他参数同 CONTROL

4.2 初始场湿度调整方法

本试验采用 Kuo 等^[9] 提出的廓线处理法进行 GPS 可降水量对 MM5 模式初始湿度场的调整试验, 即在假设模式初始湿度场垂直廓线不变的情况下, 利用 Cressman 分析方法使模式初始场的可降水量趋于 GPS 测量的可降水量, 从而调整模式初始场中湿度场的分布。

$$q'_g(k) = q_g(k) \cdot PW'_g / PW_g \quad (1)$$

其中, $q_g(k)$ 为第 k 层模式格点上的水汽混合比, PW_g 为模式格点整层累计可降水量, PW'_g 为经 GPS 资料调整后的模式格点整层累计可降水量。当 $q'_g(k) > q_g(k)$ 时, $q'_g(k) = q_s(k)$, $q_s(k)$ 为模式第 k 层由温度计算的饱和水汽混合比。

PW_g 由模式初始场格点上垂直各层的水汽混合比计算获得, 即

$$PW_g = \frac{P_g^*}{g} \sum_{k=1}^{K_s} q_g(k) \Delta\sigma(k) \quad (2)$$

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 KF 方案。模式粗网格积分时间步长为 120 s。试验中利用 NCEP 的 AVN 全球模式客观分析场输出作为 MM5 初值场, 利用 Cressman 分析方法将 2002 年 6 月 23 日 20 时的地面和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 h, 每小时输出预报结果进行比较分析。

GPS 可降水量资料的应用试验分为初始场湿度调整试验和资料同化试验两部分。首先, 利用 GPS 可降水量资料对 MM5 模式初始场进行再分析, 以调整 MM5 模式的初始湿度场。其次, 利用 GPS 可降水资料进行 MM5 模式的四维 Nudging 同化试验, 并进行不同 Nudging 系数对 GPS 资料同化效果影响的比较试验。将没有进行初始湿度场调整和资料同化的模式积分作为控制试验(记为 CONTROL), 并以之作为其他试验比较的基准, 具体试验名称和设置描述见表 1。

其中, $P_g^* = P_s - P_t$, P_s 为模式格点处的地面气压, P_t 为模式顶层气压。 g 为重力加速度, $\Delta\sigma(k)$ 为第 k 层的厚度, K_s 为 MM5 模式半 σ 面的层数。

PW'_g 通过利用 Cressman 客观分析方法将距 MM5 模式格点一定范围内 GPS 站点测量可降水量插值至模式格点上而获得。试验中 Cressman 影响半径取为模式粗网格的 3 倍网格距, 即 135 km。

4.3 四维同化方法

本试验采用 Nudging 同化技术进行 MM5 模式四维同化对比试验。Nudging 同化技术是一种简单的数值预报模式四维同化技术, 在数值预报领域得到了广泛的使用^[15~17]。MM5 模式中带有 Nudging 同化软件包, 包括观测资料站点 Nudging 和分析场资料 Nudging 两种。本研究中选用站点 Nudging 进行同化对比试验。

观测资料站点 Nudging 技术是基于模式预报和观测实况之间的误差, 在诊断方程中增加人为的强

迫项对模式预报连续强迫使其逐步趋于观测实况。模式预报与观测实况之间的误差计算后,其差值返回到观测点周围一定范围内的模式格点上。对于给定的模式预报变量 $\alpha(x, t)$, 模式变量诊断方程为:

$$\frac{\partial p^* \alpha}{\partial t} = F(\alpha, x, t) + G_\alpha \cdot p^* \cdot \frac{\sum_{i=1}^N \Psi_i^2(x, t) \cdot Y_i \cdot (\alpha_0 - \hat{\alpha})}{\sum_{i=1}^N W_i(x, t)} \quad (3)$$

其中, F 为模式物理强迫项(包括对流、科氏力效应等), α 为模式预报变量, x 为独立空间变量, t 为模式积分时间。 G_α 为 Nudging 系数。下标 i 为距格点一定范围内 N 个观测中的第 i 个。 Y 为观测资料质量因子, 取值 0~1 之间, 表示资料测量误差或代表性。 Ψ 为时间、空间四维权重因子。

在式(3)中, α 为任何模式预报变量, 如温度、风、水汽混合比等。然而, 由于 GPS 测量的可降水量不是模式预报变量而不能直接用于模式 Nudging 同化。因此, 需对可降水量进行处理。本试验采用 Kuo 等^[9]提出的廓线处理法, 利用 GPS 测量的可降水量和模式预报的可降水量反演出模式垂直各层上的水汽混合比后进行同化试验。

首先, 将 MM5 模式预报的地面气压、温度和在水汽混合比由格点双线性内插至 GPS 测站获得水汽混合比廓线后, 按式(2)同样的方法计算模式在 GPS 站点预报的可降水量 PW_m 。

其次, 在假定 MM5 模式预报的水汽混合比垂直廓线不变的条件下, 利用 GPS 测量的可降水量 (PW_s) 调整模式预报的水汽混合比廓线而获得 GPS 测站上空模式各层的水汽混合比 q_m 。

$$q_m^{(n)}(k) = q_m^{(n-1)}(k) \cdot PW_s / PW_m^{(n-1)} \quad (6)$$

其中, n 为重复次数。当 $q_m^{(n)}(k)$ 大于饱和水汽混合比时取值为饱和水汽混合比。在给定的 GPS 站点, 重复上述步骤, 使 $PW_m^{(n)}$ 逐步趋于 PW_s 。试验中, 为节省计算时间, $PW_m^{(n)}$ 与 PW_s 两者之差小于 0.01 mm 或循环次数 n 大于 20 时就完成湿度廓线的调整。调整后的水汽混合比廓线用于 MM5 同化试验。

5 试验结果分析

5.1 初始湿度场调整结果分析

由于湿度局地变化很大, 仅依靠常规探空观测

难以较好地反映湿度的时空分布, 尤其是在局地降水过程影响时湿度分析变得十分困难。GPS 测量不受天气影响能全天候对大气水汽进行监测, 且测量的精度较高, 为进一步改善对湿度分布的分析提供了可能。图 3 为宝山站经 GPS 可降水量订正前后湿度垂直廓线分布图。由图 3a 可以看出从地面至模式顶层各层的水汽混合比得到了相应的调整, 并且由于模式下层的水汽混合比大于模式上层, 因而模式下层的调整幅度要大于模式上层。相对湿度的调整效果如图 3b 所示。模式各层相对湿度调整幅度基本相近, 介于 2.8%~3.6%。

图 4 为模式初始场 850 hPa 相对湿度调整前后对比图。由图可以看出: 经湿度调整后北部湿度饱和区域略有减小。饱和区域南部高湿区向南延伸, 使得安徽东部地区湿度增加, 同时位于浙江北部地区的低湿区向西、向北扩展, 低湿区的面积明显增大。由于高湿区的向南延伸和低湿区的向北扩展, 使得安徽、浙江与江苏 3 省交界区域的湿度梯度明显增加。另外, 浙江舟山附近的湿度稍有增大, 上海地区的湿度略有减小。在 GPS 观测网影响范围以外的地区湿度没有发生改变。因此, 利用长江三角洲地区的 GPS 观测网资料对 MM5 模式初始湿度场调整可使模式初始场更好地反映湿度的局地变化特征。

5.2 预报结果分析

5.2.1 可降水量预报

图 5 为 MM5 模式可降水量预报平均误差时间序列图, 其中平均误差为模式在 11 个 GPS 站点预报的可降水量与 GPS 测量的可降水量之间差值的平均值。由图可以看出: 在 11 个站点, MM5 模式初始场对降水量的描述存在平均约 1.02 mm 的误差。该误差经 GPS 资料订正后减小至 0.41 mm。模式对降水量的预报存在一定的误差, 且预报误差在模式积分 20 h 后明显增长。除模式积分 4 h 时外, GPS 资料调整试验在模式积分的前 9 h 对降水量的预报误差要小于控制试验, 尤其是在模式前 3 h 积分该试验的预报误差最小, 模式积分 9 h 后预报误差趋于控制试验。这表明对模式初始湿度场的调整能有效地控制模式积分初期对降水量的预报误差。与控制试验相比, GPS 资料 Nudging 同化对可降水量预报误差的改善较小, 并且 Nudging 系数由 5×10^{-4} 增加值 5×10^{-1} 后预报效果并无太大的改善。模式积分时间 18 h 后, 所有试验的结果基本

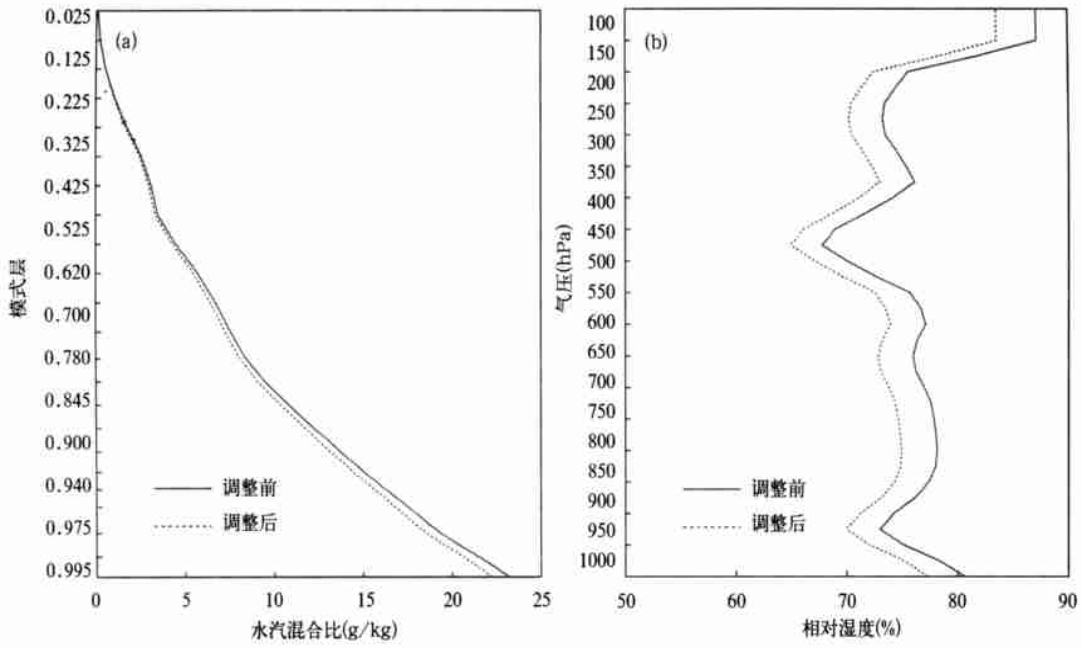


图 3 上海宝山站湿度调整前后垂直廓线分布图

(a. 水汽混合比(g/kg), b. 相对湿度(%))

Fig. 3 Vertical (a) specific humidity (g/kg) and (b) relative humidity (%) distribution comparison between non- corrected and corrected at Baoshan weather station

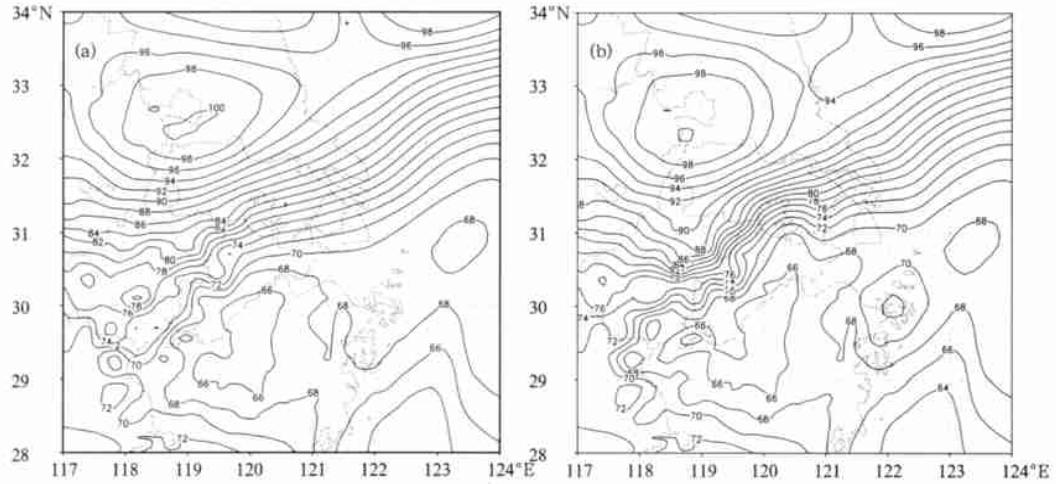


图 4 模式初始场 850 hPa 相对湿度调整前后对比图

(a. 调整前, b. 调整后)

Fig. 4 Horizontal humidity distribution comparison between (a) non- corrected and (b) corrected at 850 hPa valid at initial time

趋于一致, 这可能由于受调整和同化的天气系统已移出目标区域, 使得初始场调整和资料同化对目标区域的天气系统已无直接的影响。

图 5 给出的各试验对可降水量预报误差是 11 个站点的平均值, 具体站点的预报误差与其在目标

区域的位置和天气系统的移动有一定的关系。在本试验中, 伴随梅雨静止锋的南移, 降水过程自西向东移动, 因此, 对初始湿度场的调整和连续的 Nudging 同化对位于目标区域西侧站点的影响要小于东侧的站点。图 6 为黄山站和宝山站各试验对可降水量预

报序列图。由于黄山站位于目标区域的西侧, GPS 资料对初始湿度场的调整仅在 2 h 内对模式预报可降水量的效果有改善, 而位于目标区域东侧的宝山

站, 模式初始湿度场调整后对可降水量预报的影响持续了 9 h。试验影响效果与站点在目标区域中所处的位置关系密切。

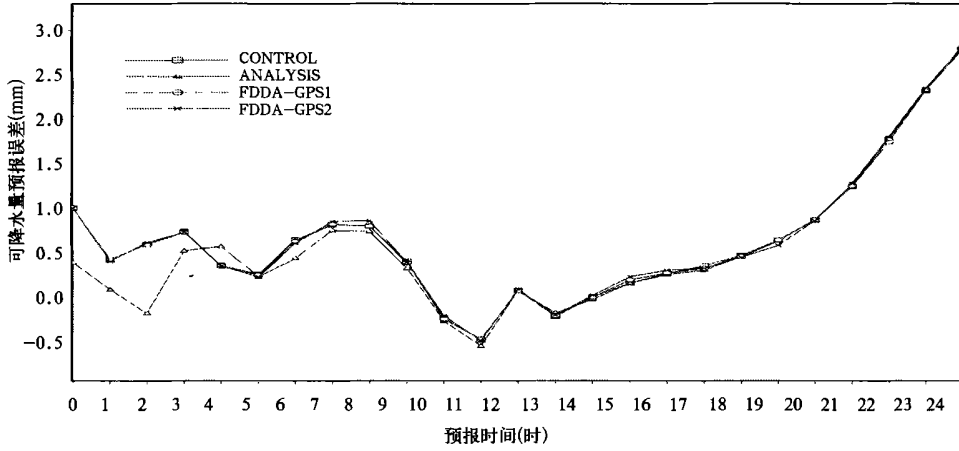


图 5 MM5 模式预报可降水量平均误差时间序列图

Fig. 5 Time series of average precipitable water prediction bias between simulated and observation

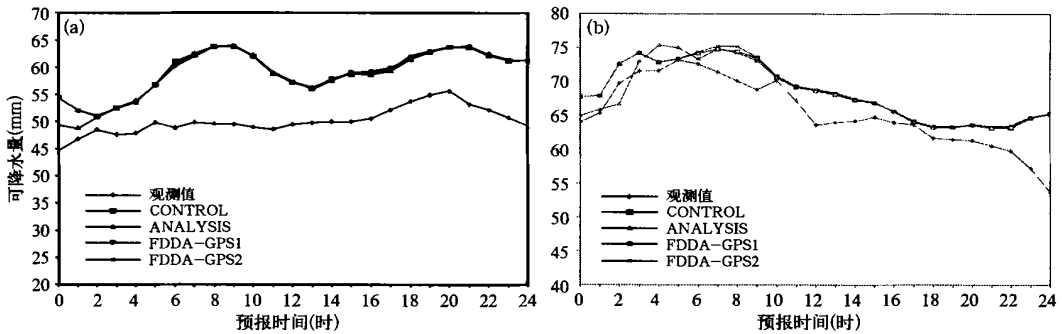


图 6 单站可降水量预报时间序列图

(a. 黄山, b. 宝山)

Fig. 6 Precipitable water comparison between simulated and observation at Huangshan GPS station (a) and Banshan GPS station (b)

5.2.2 累计降水量预报

如前所述, 6月23~24日长江三角洲地区的降水主要出现在23日20时至次日凌晨, 因此本文着重分析应用GPS资料对模式积分前6h累积降水量的影响。各试验6h累积降水量预报如图7所示。控制试验较好地预报出了整个降水区域, 在长江北部的南通地区报出了50 mm的降水中心, 与中心附近的78和69 mm的强降水基本吻合, 同时模式还报出了沿长江一线10~30 mm降水相对较大的区域。然而, 控制试验没能报出上海崇明岛75 mm的强降水, 上海北部宝山地区的降水也明显偏

小, 而浙江北部降水预报略偏大。与控制试验相比, GPS资料对初始湿度场的调整试验对强降水的预报有所改善, 不仅降水强度由50 mm增大至60 mm, 而且降水中心向东南移动了50 km, 从而改善了对上海崇明岛强降水和宝山地区降水的预报, 同时浙江北部降水预报区有所北移、雨量减小, 与实况符合得更好。不同Nudging系数的GPS资料同化试验两者之间相差较小, 对降水位置和强度预报与控制试验基本相似。总体上, 初始湿度场的调整试验对模式6h累积降水预报的影响程度要大于Nudging同化试验。

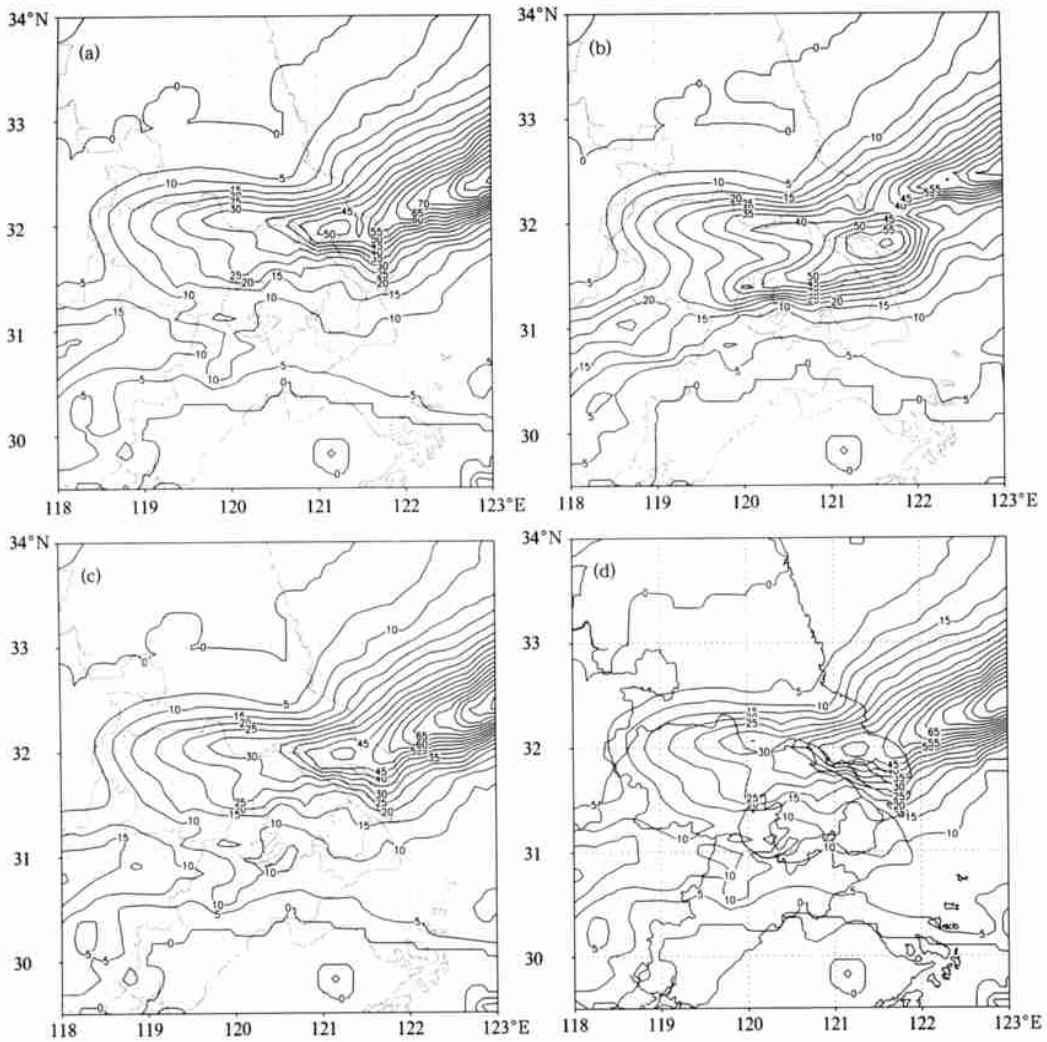


图7 各试验6 h 累积降水量预报图

(a. CONTROL, b. ANALYSIS, c. FDDA- GPS1, d.FDDA- GPS2)

Fig. 7 6 h rainfall simulated by (a) CONTROL, (b) ANALYSIS, (c) FDDA- GPS1 and (d) FDDA- GPS2

为定量评估分析同化试验对区域降水预报性能的改善程度,我们以目标区域中自动雨量站资料为比较对象,将模式预报降水量内插至自动雨量站后从站点降水预报技巧(TS)评分、平均误差和非参数秩相关系数3方面比较各试验的降水预报能力。

技巧评分是检验模式对降水预报性能的重要指标,它能反映模式对降水位置和强度的预报能力。表2为模式预报1~6 h 累积降水不同阈值的预报技巧评分。由表可以看出:与控制试验相比,初始湿度场调整试验对模式降水预报能力的提高最为明显,对不同降水阈值的预报都有改善,预报技巧评分平均提高了0.087(约5%),并且随降水的增大,改

善的效果越明显,尤其是改善了50.0 mm 以上降水预报,这是所有试验中唯一能有改善作用的。不同Nudging系数GPS可降水量资料同化的结果稍有不同,但总体上要优于控制试验,但未对50.0 mm 以上的降水作出较好的预报。值得注意的是Nudging系数的增加并非对所有量级降水预报都有改善。如表2所示,Nudging系数增加后模式对阈值为10.0 mm 左右降水预报性能减弱,而对25.0~50.0 mm 降水预报有明显的改善,这表明增加Nudging系数有利于提高模式对强降水的预报。

模式积分6 h 以后,初始产生目标区域降水的天气系统逐步移出目标区域,各试验对模式预报性

表 2 模式预报 1~ 6h 累积降水不同阈值的预报技巧评分比较

Table 2 1~ 6 h precipitation forecast skill of experiments at different thresholds

试验名称	降水阈值				
	≥ 0.01 mm	≥ 5.0 mm	≥ 10.0 mm	≥ 25.0 mm	≥ 50.0 mm
CONTROL	0.687	0.385	0.424	0.273	0
ANALYSIS	0.697	0.400	0.500	0.357	0.25
FDDA_GPS1	0.687	0.404	0.424	0.364	0
FDDA_GPS2	0.691	0.396	0.412	0.400	0

能改善较小, 仅 FDDA_GPS2 试验在模式积分 7~ 18 h 对 0.01~ 5.0 mm 的降水略有改善外, 甚至模式预报性能有时还略有下降(具体数据略)。

表 3 为模式预报不同等级累计降水(1~ 6 h)的平均绝对误差和非参数秩相关系数比较, 表中各等级降水对应站点数分别为 85, 22, 14, 7 和 3, 平均绝对误差为各试验模式预报累计降水量绝对误差的对应站点数的平均值。很明显, 与试验目标区域中观

测的雨量相比, 模式各试验对 1~ 6 h 累计降水量预报还存在相当的误差, 并且预报误差随降水量的增加而增加。与控制试验相比, GPS 资料对初始湿度场的调整试验对降水量预报改善效果要好于其他试验, 尤其是对强降水预报改善最为明显。Nudging 同化后模式降水预报误差略有减小, 并且 Nudging 系数的增加对降水量预报稍有改善。

表 3 不同等级累计降水预报(1~ 6 h)的平均绝对误差(mm)和非参数秩相关系数比较

Table 3 Comparison of Average absolute prediction bias (mm) on 1~ 6 h accumulative precipitation at different thresholds and non-parameter rank correlation coefficient.

试验名称	站点观测降水等级					非参数秩 相关系数
	≥ 0.0 mm	≥ 5.0 mm	≥ 10.0 mm	≥ 25.0 mm	≥ 50.0 mm	
CONTROL	6.936	13.975	16.101	24.751	37.680	0.725
ANALYSIS	6.572	12.973	14.385	20.208	26.048	0.814
FDDA_GPS1	6.844	13.569	15.548	23.693	35.249	0.801
FDDA_GPS2	6.877	13.258	15.268	23.027	34.148	0.806

通过以上定量分析表明: 总体上, 利用 GPS 可降水量资料调整模式初始湿度场对模式 6 h 累积降水预报的改善程度要大于连续 Nudging 同化, Nudging 系数增加有利于提高 Nudging 同化效果, 但对模式降水预报改善的程度不明显。

为进一步探讨各试验对降水预报影响的内在机制, 我们对模式预报的网格降水和次网格降水进行了分析。图 8 分别为各试验 6 h 网格累积降水和次网格累积降水与控制试验的差值。很显然, 初始湿度场调整试验对模式 6 h 累积降水的改善较为明显, 并且改善主要体现在网格降水的改变上。模式初始湿度场调整后网格降水的改变表现了明显的系统性特征。GPS 可降水量 Nudging 同化对模式 6 h 累积网格降水和次网格降水的影响都较小, 总体上对次网格降水的影响大于对网格降水的影响。由图还可以看出: 所有试验对次网格降水的影响范围大于对网格降水的影响范围, 并且对次网格降水的影响无明显的系统性特征。

由于崇明测站 6 h 累积降水达 75.2 mm, 各试验对该地区降水都有改进, 因此本文以该站为例对模式降水预报进行单站降水预报分析。图 9 为崇明站降水观测和模式预报逐时次对比图。由图可以看出: 该站降水成双峰型, 集中降水分别出现在 23 日 23 时~ 24 日 02 时。控制试验尽管报出了该站降水的双峰特征, 但降水预报存在相当的误差, 不仅 6 h 累积雨量仅为 24.99 mm, 而且降水偏早, 比实况提前了约 2 h。相比而言, 初始湿度场调整试验对降水预报的改进较明显, 6 h 累积降水达 57.16 mm, 双峰降水时间误差也缩短为 1 h。模式积分 6 h 后, 调整试验对降水预报基本没有影响。Nudging 同化试验累积降水预报均在 30 mm 以上, 但降水偏早无任何改进, 模式积分 6 h 后依然对降水预报有影响。

各试验模式预报的网格降水和次网格降水预报时间序列由图 10 给出。很明显, 模式预报的前 3 h 降水主要由次网格降水, 即由对流参数化调整产生, 其后降水主要由网格降水, 即网格点湿度饱和而产

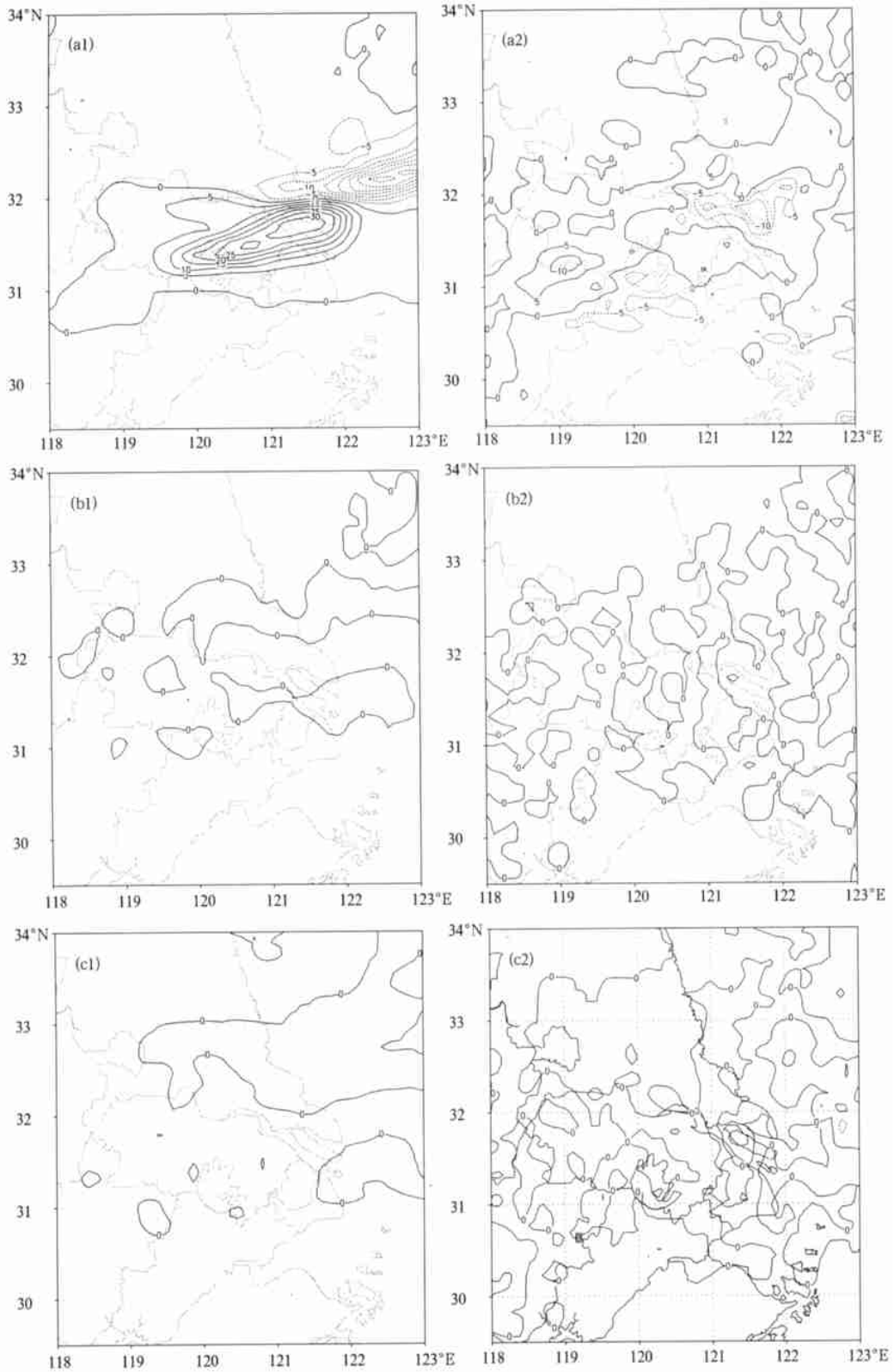


图8 各试验6 h 网格累积降水和次网格累积降水与控制试验的差值

(a, b, c分别为ANALYSIS、FDDA-GPS1和FDDA-GPS2与控制试验的差值,
1, 2分别为网格降水和次网格降水)

Fig. 8 6 h rainfall difference between simulated by (a) ANALYSIS, (b) FDDA-GPS1 and (c) FDDA-GPS2 and by CONTROL, 1 is non-convective rainfall and 2 is convective rainfall

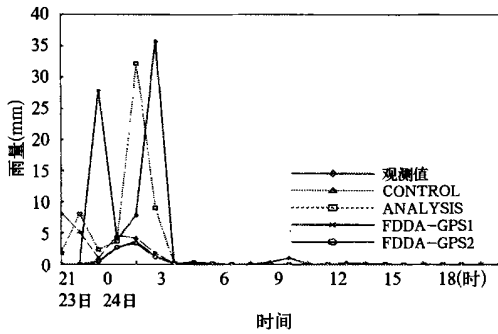


图 9 崇明站降水观测和模式预报逐时次对比图

Fig. 9 Hourly rainfall comparison between simulated by and observation at Chongming weather station

生。GPS 可降水量资料 Nudging 同化对模式网格降水预报几乎没有影响, 而初始湿度场调整试验对模式网格降水的影响十分明显, 6 h 累积网格降水由控制试验的 8.15 mm 增大至 41.44 mm, 该试验对累积降水量预报的改善主要体现在对模式网格降水的改进上。各试验对次网格降水都有影响, 初始湿度场调整试验主要表现在使次网格降水出现的时间推迟, 而降水量级无大的影响。GPS 可降水量不同 Nudging 系数同化试验对网格降水产生的时间没有影响, 但次网格降水的持续时间和降水量明显增加, 6 h 累积次网格降水分别增加了 31.7% 和 48.9%。因此, Nudging 同化试验主要通过改变模式次网格降水来影响模式对累积降水的预报效果。

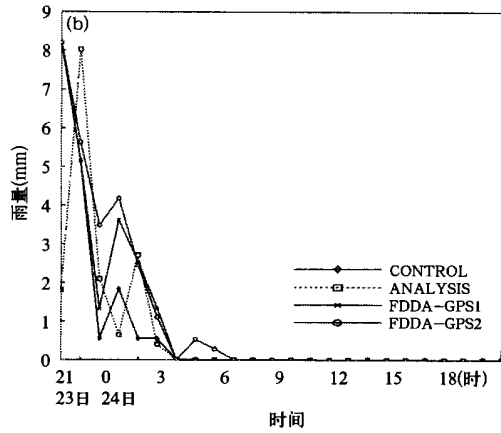
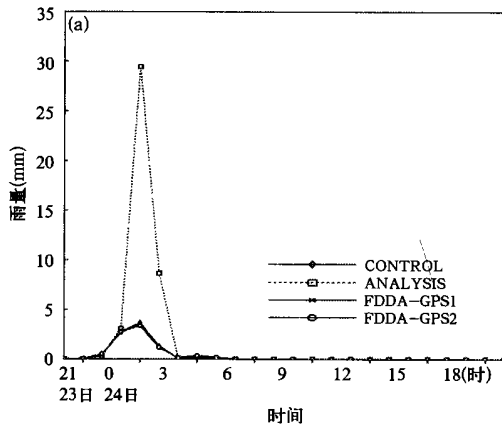


图 10 崇明站模式预报的网格降水和次网格降水时间序列图

(a. 网格降水, b. 次网格降水)

Fig. 10 Hourly (a) non-convective and (b) convective rainfall comparison of simulated and observation

6 不同个例试验和讨论

通过以上对 2002 年 6 月 23~24 日个例试验结果的分析可以看出, 利用 GPS 资料对模式初始湿度场调整对 MM5 模式 0~6 h 累计降水预报的改善要

好于 Nudging 同化的试验。然而, 物理概念上, Nudging 同化技术要比初始湿度场调整更为严密。为验证本试验结果的可信度, 我们利用同样的方法对 2002 年 6 月 20~21, 27~28 日和 7 月 17~18 日的降水天气过程进行了试验, 试验结果如表 4 所示。

表 4 不同个例模式预报平均绝对误差 (mm) 和非参数秩相关系数比较

Table 4 Comparison of Average absolute prediction bias (mm) and non-parameter rank correlation coefficient for 3 rainfall events.

试验名称	个例					
	6 月 20~21 日		6 月 27~28 日		7 月 17~18 日	
	Abs-bias	Rank-cor	Abs-bias	Rank-cor	Abs-bias	Rank-cor
CONTROL	11.94	0.357	11.74	0.692	6.53	0.335
ANALYSIS	11.36	0.393	9.05	0.744	5.91	0.403
FDDA_GPS2	11.76	0.357	11.35	0.704	6.52	0.336

注: 表中 Abs-bias 表示模式预报累计降水 (1~6 h) 的平均绝对误差, Rank-cor 表示非参数秩相关系数。

与控制试验相比,利用 GPS 资料对模式初始湿度场调整站点降水预报绝对误差分别减少 0.58, 2.69 和 0.62 mm, 非参数秩相关系数分别增加 0.036, 0.052 和 0.068, Nudging 同化试验对应降水预报绝对误差分别减少 0.18, 0.39 和 0.01 mm, 非参数秩相关系数分别增加 0.000, 0.012 和 0.001。该结果与 6 月 23~24 日个例试验类似,说明 GPS 资料的使用能在一定程度上改善模式对降水的预报性能。相对而言, Nudging 同化试验对模式 0~6 h 累积降水预报误差的减小要小于对模式初始湿度场的调整试验。从表 4 还可看出: GPS 资料使用对模式预报结果的影响在试验个例之间存在一定的差异,这可能与模式本身对天气系统的预报能力有关。总体上,模式初始湿度场调整试验对降水预报的改善还是要好于 Nudging 同化方法。

模式初始湿度场的调整试验和 Nudging 同化试验对 MM5 降水预报结果影响的差异与两种方法本身是有关的。由于探空站点稀疏,仅依靠相距约 200 km 的探空资料难以描述大气水汽的局地变化,使得模式初始湿度场存在一定的误差。模式初始湿度场的调整试验能直接减小该误差,从而能在一定程度上减小模式初期(0~6 h)预报误差。而在 Nudging 同化试验时,模式初试场对湿度的描述误差却不能被直接减小或消除,该误差将直接引入模式积分。也就是说,理论上 Nudging 同化在模式积分一开始就比模式初始湿度场调整试验存在较大的预报误差,这种预报误差只能通过对模式预报量——水汽混合比变化趋势的严格控制而逐步得到调整,其前期条件是 Nudging 同化所用的水汽混合比垂直廓线须有其真实性。然而,本文 Nudging 同化试验所用的水汽混合比垂直廓线是在假定模式预报的水汽混合比垂直廓线是准确的条件下反演获得的,而模式预报的水汽混合比垂直廓线本身可能存在一定的误差,从而使 Nudging 同化试验的效果受到一定的影响。这可能是两种试验结果产生差异的主要原因。

另外,个例试验效果的差异说明还有其他的因素制约两种试验的效果,如模式初始湿度场的调整试验中 Cressman 分析方法的影响半径和 Nudging 同化试验的 Nudging 半径应与天气系统的尺度有关,如何进一步提高 GPS 资料改善 MM5 模式预报能力效果和进行 GPS 资料的变分同化试验是我们需继续研究的内容。

7 小结

本文利用建立在长江三角洲地区 GPS 观测网中 11 个站点的可降水量资料对 2002 年 6 月 23~24 日影响长江三角洲地区的降水过程进行了初始湿度场调整和 Nudging 同化试验。通过对试验结果的分析,可以得出以下结论:

(1) GPS 是一种对常规探空观测进行水汽测量有效的补充,利用 GPS 测量的可降水量对模式初始湿度场进行调整后可明显增强模式初始场描述水汽分布的能力,有利于模式初始场更好地反映水汽局地变化的特征。

(2) MM5 模式对可降水量预报存在一定的误差。利用 GPS 资料对模式初始湿度场进行调整后能明显减小模式初始场对可降水量的描述误差,并能有效地控制模式积分初期对可降水量预报的误差。站点预报改善的程度和时效与该站点在 GPS 观测网的位置和天气系统的移动有关。利用 Nudging 技术同化 GPS 可降水量资料对可降水量预报改善较小,并且 Nudging 系数的增加对可降水量预报效果的影响不大。

(3) GPS 资料对模式初始湿度场进行调整后对模式 6 h 累积降水量预报有较明显的改善,并且改善效果随降水的增大而增加。GPS 可降水量资料 Nudging 同化能改善 6 h 累积降水量预报。不同 Nudging 系数同化对降水预报改善效果稍有不同,并且 Nudging 系数的增加并非对所有量级降水预报都有改善。总体上,利用 GPS 可降水量资料调整模式初始湿度场对模式 6 h 累积降水预报效果的改善要好于连续 Nudging 同化。

(4) 利用 GPS 资料调整模式初始湿度场改善模式累积降水量的预报主要是通过改善模式网格降水预报来实现的,初始湿度场调整后不仅对累积降水量的大小有明显改进,而且对降水起止时间预报也有改善。GPS 可降水量资料 Nudging 同化对模式降水预报的改善主要通过改善次网格降水的预报来实现的,但对降水起止时间没有影响。所有试验对次网格降水的影响范围大于对网格降水的影响范围,并且对次网格降水的影响无明显的系统性特征。

(5) 进一步提高 GPS 资料改善 MM5 模式对降水的预报性能,依然有诸如 Cressman 分析半径、Nudging 同化参数选择及如何消除改善效果对天气系统的依赖性问题还需深入研究。

参考文献

- 1 Park S, Droegemeier K. Sensitivity of 3-D convective storm evolution to water vapor and implications for variational data assimilation. Preprints, 11th Conf. On Numerical Weather Prediction, Norfolk, VA, Amer Meteor Soc, 1996, 137~ 139
- 2 Crook N. Sensitivity of Moisture convective forced by boundary layer processes to low-level thermodynamic fields. *Mon Wea Rev*, 1996, 124: 1767~ 1785
- 3 熊永清. 利用地面 GPS 技术绝对测定湿大气含量的可能性. *气象学报*, 1999, 57(5): 632~ 639
- 4 Bevis M, Businger S, Herring T A, et al. GPS meteorology: Remote sensing of atmospheric water vapor using the global positioning system. *J Geophys Res*, 1992, 97: 15787~ 15801
- 5 Cucunull L, Navasques B, Ruffini G, et al. The use of GPS to validate NWP systems: The HIRLAM model. *J Atmos Oceanic Tech*, 2000, 17: 773~ 787
- 6 Kopken C. Validation of integrated water vapour from numerical models using ground based GPS, SSM/I, and water vapor radiometer measurements. *J Appl Meteor*, 2001, 40: 1105~ 1117
- 7 陈世范. GPS 气象观测应用的研究进展与展望. *气象学报*, 1999, 57(2): 242~ 252
- 8 Rocken C, Van Hove T, Johnson J, et al. GPS storm-GPS sensing of atmospheric water vapor for meteorology. *J Atmos Oceanic Tech*, 1995, 12: 468~ 478
- 9 Kuo Y-H, Guo Y-R, Westwater E R. Assimilation of precipitable water vapor into mesoscale numerical model. *Mon Wea Rev*, 1993, 121: 1215 ~ 1238
- 10 Kuo Y-H, Zou X, Guo Y-R. Variational assimilation of precipitable water using a nonhydrostatic mesoscale adjoint model. *Mon Wea Rev*, 1996, 124: 122~ 147
- 11 Guo Y-R, Kuo Y-H, Dudhia J, et al. Four-dimensional variational data assimilation of heterogeneous mesoscale observations for a strong convective case. *Mon Wea Rev*, 2000, 128: 619~ 643
- 12 Smith T L, Benjamin S G, Shwartz B E, et al. Using GPS-IWV in a 4-D data assimilation system. *Earth Plants Space*, 2000, 52: 921~ 926
- 13 De Ponte M, Zou X. A case study of the variational assimilation of GPS zenith delay observations into a mesoscale model. *J Appl Meteor*, 2001, 40: 1559~ 1576
- 14 Grell G. A, Dudhia J, Stauffer D R. A description of the Fifth Generation Penn State/NCAR Mesoscale Model(MM5). NCAR Tech. Note NCAR/TN-398+ STR, 1995. 122pp
- 15 Lorenc A C, Bell R S, MacPherson B. The Meteorological Office analysis correction data assimilation scheme. *Quart J Roy Meteor Soc*, 1991, 117: 59~ 89
- 16 Wang Jia. A nowcast/forecast system for coastal ocean circulation using simple nudging data assimilation. *J Atmos Oceanic Technol*, 2001, 18: 1037~ 1047
- 17 Yap K. Impact of a Newtonian assimilation and physical initialization on the initialization and prediction by a tropical mesoscale model. *Mon Wea Rev*, 1995, 123: 833~ 861

PRELIMINARY STUDY ON APPLYING GPS OBSERVATIONS TO MESOSCALE NUMERICAL WEATHER PREDICTION MODEL

Yuan Zhaohong

(*Shanghai Meteorological Bureau, Shanghai, 200030; Nanjing Institute of Meteorology, Nanjing, 210044*)

Ding Jincai

(*Shanghai Weather Center, Shanghai 200030*)

Chen Min

(*Shanghai Pudong Meteorological Center, Shanghai 200235*)

Abstract

Water vapor is a critical atmospheric variable for the description of the state and evolution of many physical processes. Lack of precise and continuous water vapor data is one of the major error sources in NWP. The Global Positioning System (GPS) can monitor the precipitable water (PW) continuously at low cost. The GPS data has been used to improve NWP in recent years. Based on the GPS precipitable water data at 11 sites of GPS networks in Yangtze delta, The experiments on initial humidity fields reanalysis and Nudging assimilation were conducted to investigate the improvement of MM5 simulation on rainfall event from 23 to 24 July 2002. The results show that initial humidity fields reanalyzed by using GPS PW can obviously improve its capability in revealing the water vapor distribution, which can result in decreasing water vapor error in initial fields of MM5. It also can restrain PW prediction bias during the earlier period of model integration and improving the 6h accumulated precipitation prediction. Nudging assimilation of GPS PW data can improve precipitation prediction slightly with different effects at different precipitation thresholds, and increasing nudging gain coefficient play a little role in improving precipitation prediction. On the whole, the results which are obtained by the reanalysis are better than by the nudging assimilation. It's also found that the reanalysis influences the results of 6h accumulated precipitation on amount and occurring time through changing the non-convective precipitation prediction mainly. The precipitation prediction improved by the nudging assimilation are substantially associated with convective precipitation change.

Key words: GPS, Precipitable water(PW), Assimilation, Mesoscale NWP model.