GPS 可降水量资料应用于 MM5 模式的变分同化试验*'

袁招洪

(上海市气象局,上海,200030)

摘 要

利用建立在长江三角洲地区 GPS 观测网中 13 个站点的资料对 2002 年 6 月 27~28 日影响长江三角洲地区的 降水过程进行了 MM5 背景误差调节和可降水量资料的三维变分同化试验。试验结果表明:背景误差对三维变分 同化的效果起着关键作用,模式变量(*u*,*v*,*T*,*p* 和 *q*)误差的水平尺度与 NMC 方法的平均时间长度有直接的关系。利用 NMC 方法重新构建的背景误差更接近实际的背景误差。

三维变分技术能有效地同化 GPS 可降水量资料。GPS 可降水量资料的同化使用不仅能调整模式初始湿度 场,而且也能相应地调整模式初始气压场、温度场和风场。GPS 可降水量资料的同化有利于减小模式初始场对可 降水量的分析误差,并且有利于减小模式积分初期(3~6 h)可降水量的预报误差。与没有进行 GPS 可降水量同化 相比,通过 GPS 可降水量资料的三维变分同化,使 MM5 模式 6 h和 24 h累计降水能力得到提高,改善了 MM5 模 式降水预报性能。总体上,GPS 可降水量资料的变分同化有利于模式降水预报能力的提高。 关键词: GPS,可降水量,三维变分同化,MM5。

1 引 言

现代数值预报模式业务应用的一个重要目标就 是提高短期天气预报能力,尤其是强对流天气和降 水的预报能力。然而,依靠站点分布稀疏、观测时次 少的常规探空观测难以反映大气水汽的时空变化, 使得大气湿度场不精确的描述依然是提高数值预报 能力的制约因素。GPS 能以与探空观测相当的精 度连续、全天候地对大气水汽进行测量^[1~3],如何更 有效地应用 GPS 水汽测量提高中尺度数值预报模 式的预报精度,尤其是使用三维变分同化技术同化 GPS 可降水量资料已成为 GPS 气象学研究的重要 课题。

GPS测量的可降水量不能直接应用于数值预 报模式,GPS资料的变分同化技术已成为GPS观测 资料应用于数值预报模式的主要途径和趋势。可降 水量资料同化试验始于 20 世纪 90 年代。1993 年 Kuo 等^[4]基于分辨率为 40 km 的 MM5 模式,在假 定湿度廓线不变的条件下,首次利用模拟的可降水 量资料调整大气湿度廓线后进行了 Nudging 同化 试验,结果表明可降水量资料的使用能提高模式短 期(24 h)降水预报能力。随后,变分同化技术开始 应用于 GPS 可降水资料同化试验。Kuo 等^[5]进行 了四维变分(4DVAR)同化可降水量资料的尝试,得 出了同化可降水量资料使水汽垂直结构和短期降水 预报得以改善的结论,并证明四维变分同化可降水 量资料是可行的。Guo 等^[6]针对 1996 年 9 月发生 在美国中部的一次飑线过程进行了 GPS 可降水资 料的四维变分同化试验,结果显示 GPS 可降水资料 的使用能明显改善 MM5 模式对总降水量的预报正 确率。针对不同的模式、利用不同的同化方法对 GPS 资料的应用研究都表明:GPS 可降水资料的使 用为改善数值预报模式对大气湿度的分析和提高降 水预报精度提供了可能^[7~10]。

本文基于长江三角洲地区 GPS 观测网的可降 水量资料,以 2002 年 6 月 27~28 日发生在长江三

^{*} 初稿时间:2004年7月15日;修改稿时间:2004年10月20日。 资助课题:中国科学院知识创新工程重要方向项目(KJCX2-SW-T1-3)。 作者简介:袁招洪,男,1965年生,高级工程师,博士,主要从事大气探测和遥感应用技术研究。E-mail: zhaohong. yuan@smb.gov.cn

角洲地区的强降水过程为例,通过三维变分同化技 术同化 GPS 可降水量资料的试验,分析评估 GPS 可降水量资料对 MM5 模式降水预报的影响。

2 基本原理

2.1 三维变分同化

三维变分同化整合某一时间段内(或时间窗)描述大气状态的所有可用信息而生成给定时间(分析时间)大气状态的估计。描述大气的信息包括常规地面、高空观测、雷达探测、卫星遥感、风廓线仪和GPS测量等观测资料,以及数值预报模式的预报(背景或初估场),同时还包括观测资料误差和模式背景误差。三维变分同化系统利用各种观测资料估计大气状态的过程是寻求最大可能存在的大气状态 使目标函数(J)最小化的过程,即

$$I = \frac{1}{2} (x - x_{\rm b})^{\rm T} B^{-1} (x - x_{\rm b}) + \frac{1}{2} (H(x) - y_{\rm o})^{\rm T} R^{-1} (H(x) - y_{\rm o})$$
$$= I_{\rm b} + I_{\rm c}$$
(1)

其中,x_b为模式背景场,B为模式背景误差,y_o为各种大气观测,R为观测误差,H为观测算子,观测算 子表示模式空间向观测空间的一种映射。

*J*最小,则其偏导数为0,即估计的真实大气状态 *x*。需满足

$$\nabla J = 0 = B^{-1} (x_{a} - x_{b}) + H^{T} R^{-1} (H x_{a} - y_{a})$$
(2)

其中, $H = \frac{\partial H}{\partial x}$ 是非线性观测算子 H 的正切线性近似。这样,就可以解出真实大气估计场

这样, 舰可以解出其头人飞怕计场
$$x_{a} = x_{b} + [B^{-1} + H^{T}R^{-1}H]^{-1}$$
.

$$HR^{-1}(y_0 - H(x_h)) \tag{3}$$

三维变分同化系统同化各种观测资料的过程就 是求解上式的过程。

2.2 MM5 模式可降水量的计算

MM5模式格点可降水量(P_{wg})依据模式初始 场格点上各层的水汽混合比计算,即

$$P_{\rm wg} = \frac{p^*}{g} \sum_{k=1}^{\kappa_{\sigma}} q(k) \Delta \sigma(k) \tag{4}$$

其中, $p^* = p_s - p_t$, 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,q(k)为模式第 k层上的水汽混合比, $\Delta\sigma(k)$ 为第 k 层的"厚度", K_s 为 MM5 模式半 σ 面的层数。

2.3 GPS 可降水量的计算

GPS 天顶湿延迟(Z_w)获得后就可以反演大气 可降水量。Bevis 等^[2]给出了由天顶湿延迟转化为 可降水量的计算公式,即

$$P_{\rm W} = \Pi \times Z_{\rm W} \tag{5}$$

其中,

$$\Pi = \frac{10^8}{\rho_{\rm w} R_{\rm v} [(k_3/T_{\rm m}) + k'_2]}$$
(6)

 $\rho_w 为液态水的密度, R_v 是水汽气体常数(461.5 J/(kg・K)), T_m 为大气平均温度。 П 为无量纲数, 其 值大约为 0.15, 与 <math>T_m$ 的大小直接有关。Davis 等^[11]提出了 T_m 的定义式

$$T_{\rm m} = \frac{\int (e_{\rm w}/T) \,\mathrm{d}z}{\int (e_{\rm w}/T^2) \,\mathrm{d}z} \tag{7}$$

其中 ew 为水汽压。

通常采用探空资料统计的方法给出 T_m 的估计 式。如 Bevis 等^[1]统计 27°~65°N、0~1.6 km 高度 的 15 个美国探空站近 2 年共 8718 次探空廓线资 料,得到了 $T_m = 70.2 \pm 0.72 T_s$ 的经验公式(T_s 为 地面温度),计算了 GPS 站点上空大气平均温度。

3 天气过程描述

2002年6月27~28日的强降水过程发生在 2002年梅雨期的第2阶段。6月19日长江三角洲地 区进入梅雨期,梅雨带北跃至淮河流域,25~26日梅 雨带南退至江南南部,27 日重新北跃至长江流域,28 ~29 日又退回江南。27~28 日的降水过程就是在梅 雨带南退过程中高空槽配合中低空切变线上低涡东 移发生的。从 27 日 20 时(北京时,下同)~28 日 20 时24 h 累计雨量分布可见,有20个站点超过50 mm,在安徽黄山附近24h累计降水达到132mm(图 1a),因而 6月 27~28 日影响长江三角洲地区的天气 过程是一次明显的梅雨静止锋的暴雨过程。由图 1 中 6 h 累计降水分布可以看出,20 个测站出现暴雨的 时段有一定的差异。上海及杭州湾北部出现的暴雨 主要在 6 月 27 日 20 时~28 日 14 时,在这 18 h 中降水 比较均匀。杭州湾南部的降水主要集中出现在 6 月 27 日 20 时~28 日 02 时。黄山附近的暴雨主要由 6 月 27 日 20 时~28 日 02 时和 6 月 28 日 08~14 时两次过程 产生。太湖西部 86 mm 的降水主要出现在 6 月 28 日 02~08时之间,反映出 6月 27~28日 20个站点暴雨 不仅空间分布不均匀,而且出现的时间也有差异。



4 试验资料

4.1 GPS 资料

GPS 资料取自长江三角洲地区 GPS 观测网中

13个站点(图 2)的观测资料。各站 GPS 资料收集后,利用 GAMIT 软件每半小时进行累计可降水量 和其他参数的计算。本试验以整点 GPS 反演的可

4.2 气象观测资料

同化试验所需的 2002 年 6 月 27 日 20 时的地 面和高空观测资料取自 9210 工程 PCVSAT 系统, 经资料质量控制和格式转换后供 MM5-3DVAR 系 统使用。

本试验的目标区域(图 2)中建有稠密的自动雨 量站网。文中利用目标区域中 82 个自动雨量站每 小时测量的累计雨量分别计算 6 h 和24 h累积降雨 量,用于各试验的对比分析。



5 试验设置

5.1 模式设置

MM5模式^[12]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 km 和 15 km,格 点数分别为 87×95 和 52×62。细网格覆盖了长江 三角洲地区 GPS 观测网的 13 个站点。模式湿物理 过程采用包含冰相过程的混合相(Mix phase)计算 方案,积云参数化方案选用 BM 方案。模式粗网格 积分时间步长为 120 s。

变分同化系统选用由 NCAR 开发、并最终为 WRF(Weather Research Forecast)模式使用的三维 变分同化系统,即与 MM5 模式配套的 MM5-3DVAR 三维变分同化系统。

5.2 试验方案设置

5.2.1 背景误差的调节

由于无法实时获取真实的模式背景误差,常采

取统计的办法估计模式背景误差。NMC 方法^[13]是 普遍采用的背景误差统计估计方法。然而,NMC 方法仅能提供"气候"意义上的背景误差,其与平均 时间长度、模式参数化方案和模式分辨率等多种因 素有关,因此 NMC 方法计算的背景误差是不精确 的,需要对背景误差进行调节。

首先,比较 NMC 方法使用不同平均时间长度 对所估计的背景误差的影响,并与 MM5-3DVAR 系统所提供的背景误差(记为 NCAR-BES)进行比 较。其次,进行背景误差的调节。为此,在模式格点 (50,40,13),即(38.01°N,110.51°E, σ = 0.62)处 加入"点扰动"(p,q,T,u,v)进行同化试验(表 1), 以基于 KF 积云参数化方案(简称 KF 方案)的 MM5模式预报结果(2002年6月20~27日)、利用 NMC 方法计算的模式背景误差(记为 KF-BES)为 例,与 NCAR-BES 作为背景误差的同化结果进行比 较,在此基础上调节背景误差。

表 1 "点扰动"同化试验值列表 Table 1 Value of model variables for "single observation" variational assimilation

variational assimilation						
模式变量	<i>u</i> (m/s)	v (m/s)	p (hPa)	Т (К)	q (kg/kg)	
"点扰动"值	3	3	5	2	0.05	
观测误差	1	1	2	1	0.01	

5.2.2 变分同化试验

GPS 可降水量资料三维变分同化试验分 3 部 分(表 2)。① 用 MM5 模式系统自带的 Cressman 客观分析方法对地面、高空观测资料进行客观分析, 形成 MM5 模式初始场后进行降水模拟试验,并将 该试验作为控制试验(记为 Control);② 用三维变 分同化技术对地面、高空观测资料进行同化分析,形 成 MM5 模式初始场后进行降水模拟试验,试验中 未加入 GPS 可降水量资料;③ 用三维变分同化技 术将地面、高空观测资料和 GPS 可降水量资料进行 同化分析,形成 MM5 模式初始场后进行降水模拟 试验。根据这 3 种试验获得模式粗网格初始场,模 式细网格初始场从粗网格初始场内插得到。

试验中 GPS 可降水量的测量误差取为 2 mm, 地面、高空观测资料观测误差采用欧洲中期天气预 报中心(ECMWF)变分同化方案所使用的值。用 NMC 方法使用 MM5 模式连续 10 d 的 12,24 h 预 报差值平均计算得出背景误差协方差矩阵,并对背 景误差进行调节。

表 2	试验名称和方案描述
~~~ =	

Table 2 Summary of experiment designs

4 \ L
拉
客观分析方法对地面、高空观测 式的初始场,无变分同化。
公分析后得到 MM5 模式初始场, 降水量资料。
资料进行三维变分同化分析后得 同 Control。

# 6 试验结果

#### 6.1 背景误差的调节

图 3 为 KF-BES 的模式控制变量误差水平尺度 与 NCAR-BES 对应值的比较。由图可见,不同平均 时间长度所得到的模式控制变量误差的水平尺度有 差异。KF-BES的流函数( $\phi$ )和速度势函数( $\chi$ )误差 水平尺度值基本在 300~400 km,明显小于 NCAR-BES 中两者的对应值(800~1000 km)。同样,KF-BES 的不平衡气压( $p_u$ )误差水平尺度在 200 km 左 右,也明显小于 NCAR-BES 中其对应值(400~500 km)。由于 NCAR-BES 的分辨率为 210 km,



(a. 流函数( $\phi$ ), b. 速度势函数( $\chi$ ), c. 不平衡气压( $p_u$ ), d. 水汽混合比(q)) Fig. 3 Horizontal scalelength of model control variables from KF-BES and NCAR-BES (a. Streamfunction( $\phi$ ), b. velocity potential ( $\chi$ ), c. unbalanced pressure ( $p_u$ ), d. specific humidity (q))

而本试验对应的模式分辨率为 45 km,因此以上差 异可能与模式分辨率有关。与ψ,χ 和 pu 不同,水汽 混合比(q)的误差水平尺度本身变化很大,KF-BES 计算值与 NCAR-BES 提供值较为接近。所有的模 式控制变量误差水平尺度随高度均有差异,其中 q 的误差在垂直层上的变化最大。

图 4,5 分别利用 KF-BES 与 NCAR-BES 进行 "点扰动"同化试验对模式初始场影响的水平、垂直 剖面比较图,其中图 4 为模式第 13 层( $\sigma$ = 0.62)的 情况,从对应纬度为 38.01°N 的剖面(图 5)可见,利 用 KF-BES 与 NCAR-BES 进行"点扰动"同化试验 对不同的模式变量影响不尽相同。对气压而言, NCAR-BES"点扰动"同化试验影响范围几乎覆盖 了模式水平和垂直整个区域,明显大于 KF-BES 试 验。NCAR-BES试验对气压影响最大值位置偏移 了"点扰动"的所在位置约 300 km,而且其值也超过 了"点扰动"值,这似乎是不合理的。同样,NCAR-BES"点扰动"同化试验对温度和风的影响也存在影 响区域明显大于 KF-BES 试验的现象。相对而言, 两试验对湿度(图中以相对湿度表示)在水平面上的 影响范围基本接近,但尽管如此,两试验在垂直剖面 上却存在差异,NCAR-BES 试验在垂直面上的影 响范围大于 KF-BES 试验,并且在  $\sigma = 0.6$  和  $\sigma =$ 0.2 处分别出现了两个 6.5% 大值区, 而 KF-BES 试 验仅在"点扰动"位置出现了 3.5%的大值区。很显  $_{, \pm, \pm, \sigma} = 0.2$ 处的分析不合理。因此,总体上 KF-BES 试验结果比 NCAR-BES 的试验结果更趋 合理,这表明利用 NMC 方法重新计算背景误差有 利于获得更合理的背景误差。

但同时也可发现利用 KF-BES 进行"点扰动"同 化对模式变量的影响范围也偏大,如 *p*,*T*和风速的 影响范围在 2000 km 左右,*q*的影响范围要小于其 他模式变量,但也达到了 1500 km。因此,需对控制 变量的水平尺度进行调节。

在 MM5-3DVAR 系统中设置了可调节模式控制变量误差水平尺度的系数。本试验将 ψ,χ 和 pu 的调节系数设置为 0.11,水汽混合比(q)的调节系 数设置为 0.18(图 6)。与图 4 相比,"点扰动"对应 模式变量的影响范围明显减小,结果基本合理。

#### 6.2 初始场调整分析

图 7 为 3DVAR-NOIPW 与 3DVAR-IPW 试验 850 hPa 初始场气象要素场差值图,即 GPS 可降水 量资料三维变分同化与未使用 GPS 可降水量资料 同化模式初始场气象要素的差值。由于大气可降水 量是大气湿度的函数,经过 GPS 可降水量资料三维 变分同化,使模式初始场的相对湿度得到了调整(图 7a),在太湖以东、上海、杭州湾以及浙江北部地区 850 hPa 的相对湿度得到了增加,其中在浙江舟山 地区相对湿度增加超过了 10%。GPS 观测网覆盖 的其他地区相对湿度则不同程度地减小了,相对湿 度减小最大(3%)的地区出现在安徽宣城、马鞍山等 安徽东部地区。

有趣的是,GPS 可降水量资料的三维变分同化 使模式初始湿度场进行了有效调整的同时,模式的 其他要素场也得到了一定的调整。在相对湿度增大 的区域温度略有下降,而在相对湿度减小的区域温 度则略有上升(图7b)。图7c所反映出的气压场变 化与温度场变化正好相反,即在相对湿度增大的区 域气压上升,而在相对湿度减小的区域气压也随之 下降。同样 GPS 可降水量资料的变分同化使 u,v 分量初始场也发生了一定的变化。由于 GPS 可降 水量资料三维变分同化后对 T,u,v 场虽有影响,但 程度很小,对实际的模式预报无太大的意义,但对 p 影响程度相对较大,如在浙江舟山附近 GPS 可降水 量资料的同化使用使气压增大 0.4 Pa 以上,这可能 对模式预报结果产生一定的影响。

GPS 可降水量变分同化使模式初始湿度场得 到相应调整的同时使模式其他要素也得到一定调整 的原因可能是:尽管 GPS 可降水量资料本身不包含 温度、气压和风的信息,但由于三维变分同化在求解 的过程中使用了空气质量、风的平衡方程、理想气体 状态方程等动力和热力约束条件,使湿度以外的其 他模式变量也得到间接的调整。

#### 6.3 可降水量预报分析

图 8 为模式粗网格各试验预报的可降水量与 GPS 测量的比较。在模式初始时刻经 GPS 可降水 量资料变分同化后,模式粗网格在江苏东台、安徽马 鞍山、上海奉贤和浙江舟山 4 个 GPS 站点可降水量 的分析偏差得到减小,并且在模式积分的前 3~6 h,同化后模式对可降水量的预报偏差小于未进行 GPS 可降水量资料同化的试验结果。这表明 GPS 可降水量资料的同化有利于提高 MM5 模式积分初 期对可降水量的预报能力。各站点 GPS 可降水资 料同化对模式可降水量预报改进时效存在一定差 异,如位于目标区域西侧的上海奉贤站的改进时效 达6 h,而位于目标区域东侧的安徽马鞍山站的改进





4 期



时效近3h。这主要是由于天气系统由西向东移动,随模式积分时间的增加,初始湿度场中得到调整的区域逐步移出了目标区域。这也说明 GPS 可降水资料同化对模式可降水量预报改进时效与该GPS站点在目标区域中所处的位置有关。另外,由图8还可发现3种试验模式粗网格(45 km)对可降水量的变化趋势预报较为平缓,未能反映出可降水量逐时次的变化幅度,这也反映出 MM5 模式粗网格难以预报出水汽局地变化快的特征。

尽管 GPS 可降水量资料的变分同化有利于减 小模式粗网格积分初期(3~6 h)的可降水量预报误 差,但随模式积分时间的延长,模式对 4 个 GPS 站 点可降水量的预报存在明显差异,并且预报偏差明 显。在上海奉贤和浙江舟山站模式预报的可降水量 的平均绝对偏差超过了 4.0 mm,并且浙江舟山站 的预报平均绝对偏差是马鞍山站近 1 倍,反映出了 站点预报的差异性(表 3)。单个站点的预报偏差也 存 在差异,如在上海奉贤站,模式积分至15h时,



after tuning control variables of model

(a. pressure (hPa), b. specific humidity (%), c. temperature (K) and d. wind speed (m/s))

表 3 模式各试验方案预报可降水量平均绝对偏差(mm) Table 3 Average absolute bias of precipitation prediction from different experiments

		1		
试验名称	东台站	马鞍山站	奉贤站	舟山站
Control	3.97	2.56	5.41	5.33
3DVAR-NOIPW	2.82	2.25	5.47	4.66
3DVAR-IPW	3.34	2.25	4.22	4.00

Control, 3DAVR-NOIPW 和 3DAVR-IPW 的预报 误差超过了 9.9 mm。各试验方案预报结果相比, 变分同化对可降水量的预报平均绝对偏差小于 Control 试验,但可降水量变分同化与无 GPS 可降 水量资料的变分同化相比无明显的改进。

#### 6.4 累积降水量预报分析

图 9 为 Control, 3DAVR-NOIPW 和 3DAVR-IPW 试验对不同降水等级(0.1,5,10,25 和 50 mm) 的预报技巧评分(*T*s 评分)比较。由图 9a 可以看 出:在模式积分的前 6 h, Control 试验比 3DVAR- NOIPW 和 3DVAR-IPW 试验表现了较高的预报技 巧,在 5,10 和 50 mm 降水等级上累计降水预报 T_s 评分比变分同化试验高 0.2,尤其是大于 50 mm 的 降水,2 种变分同化试验都没有预报技巧,3 种试验 都没能模拟出图 1a 中浙江北部超过 50 mm 的降 水。3DVAR-IPW 与 3DVAR-NOIPW 相比,除 25 mm降水等级外,3DVAR-IPW 的预报技巧要高 于 3DVAR-NOIPW。

模式积分 6~12 h时,3DVAR-IPW 对 6 h 累计 降水表现了较高的预报技巧(图 9b)。除 5 mm 和 25 mm降水等级降水预报技巧略低于 Control 试验 外(*T*s 评分分别相差 0.01 和 0.015),在其他降水 等级上 3DVAR-IPW 对 6 h 累积降水预报技巧要高 于 Control 试验。同样,3DVAR-IPW 试验对所有 降水等级的降水预报技巧都高于 3DVAR-NOIPW 试验,尤其是对 50 mm 的集中降水表现了较好的预 报技巧。如图 10 所示,3DVAR-IPW 试验对太湖西





- 图 7 3DVAR-NOIPW 与 3DVAR-IPW 试验 850 hPa 初始场气象要素场差值
  - (a. 相对湿度(%)场,b. 温度(K)场,c. 气压(Pa),
     d. u分量(m/s),e. v分量(m/s))
- Fig. 7 Differences distribution of (a) humidity (%),
  (b) temperature (K), (c) pressure (Pa), (d) u
  component (m/s) and (e) v component (m/s)
  between 3DVAR-IPW and 3DVAR-NOIPW



Fig. 8 Precipitable water comparison between observation and model prediction simulated by experiments of Control, 3DVAR-IPW and 3DVAR-NOIPW at (a) Maanshan, (b) Dongtai, (c) Fengxian and (d) Zhoushan

部 75 mm 降水位置和大小的预报明显好于 3DVAR-NOIPW 试验和 Control 试验的结果。但 需指出的是 Control 试验对浙江舟山附近和上海南 部降水的预报优于变分同化试验。尽管 3DVAR-IPW 试验对 3DVAR-NOIPW 试验的预报结果有所 改善,但两者对上海南部降水的预报均偏大,这表明 GPS 可降水量资料三维变分同化的效果受制于常 规资料三维变分同化的效果。

模式积分 12~18 h 时各试验的预报结果(图 9c)表明,变分同化试验对 6 h 累积降水的预报技巧 评分高于 Control 试验,而在模式积分 18~24 h 时 Control 试验的 6 h 累积降水的预报技巧评分则高 于变分同化试验。

24 h 累计降水预报技巧评分的比较由图 9e 给 出。很显然,变分同化试验对 5 mm 以下累计降水 的预报技巧评分与 Control 试验基本接近,对 10 和 50 mm 降水等级的预报技巧评分低于 Control 试 验,而对 50 mm 等级降水的预报技巧评分却大于 Control 试验。另外,在所有等级的 24 h 累计降水 的预报上,3DVAR-GPS 试验的预报技巧评分要高 于 3DVAR-NOIPW。

综上所述,在模式积分的前 6 h Cressman 客观 分析试验对累计降水预报优于变分同化试验的预 报,但在模式积分的 6~18 h 之间变分同化对 6 h 累计降水的预报能力则优于 Cressman 客观分析试 验的预报结果。总体上,GPS 可降水量资料的同化 有利于模式降水预报能力的提高。

#### 7 结论和讨论

本文利用建立在长江三角洲地区 GPS 观测网中 13 个站点的可降水量资料对 2002 年 6 月 27~ 28 日影响长江三角洲地区的降水过程进行了模式 背景误差调节和 GPS 可降水量三维变分同化试验。 通过对试验结果的分析,可以得出以下结论:







(1)"点扰动"同化试验表明背景误差对三维变 分同化的效果起着关键作用。模式变量(u,v,T,p 和q)误差的水平尺度与 NMC 方法的平均时间长度 有直接的关系,不同的模式变量的误差水平尺度存 在差异,并且同一模式变量误差水平尺度在模式不 同高度上也存在差异。使用 NMC 方法重新构建的 背景误差更接近实际的背景误差。

5

10

R (mm)

25

50

0.0

0.1

(2) 三维变分技术能有效地同化 GPS 可降水 量资料。GPS 可降水量资料的同化使用不仅能调 整模式初始湿度场,而且使模式初始气压场、温度场和风场也得到一定的调整。

(3) GPS 可降水量资料的变分同化有利于减小 模式初始场对可降水量的分析误差,从而有利于减 小模式积分初期(3~6 h)可降水量的预报误差,并 且模式可降水量预报改进的时效与其在目标区中所 处的位置有关。

(4) 与没有进行 GPS 可降水量同化相比, 通过GPS可降水量资料的三维变分同化,使MM5模



式 6 和 24 h 累计降水能力得到提高,改善了 MM5 模式降水预报性能。总体上,GPS 可降水量资料的 变分同化有利于模式降水预报能力的提高。

诸多因素制约着 GPS 可降水量资料同化对降 水预报的改善效果,如式(3)所示,GPS 可降水量资 料三维变分同化的效果除与 GPS 可降水量资料本 身有关外,还与模式初值(x_b)、模式背景误差(B)和 GPS 可降水量观测误差(R)等因素有直接的关系, 尤其是模式背景误差对 GPS 可降水量资料同化试 验结果起关键作用。GPS 可降水量资料同化试 的目的是将 GPS 可降水量与模式初值中对应的可 降水量差值分配到模式各垂直上以获取更合理的模 式垂直层上,取决于模式背景误差中水汽混合比背 景误差的垂直分布和 GPS 可降水资料的观测误差。 尽管为获得合理的 MM5 模式背景误差,本文利用





NMC 方法重新计算了模式背景误差,并进行了调 节试验,然而如何获取更合理的模式背景误差依然 是需进一步研究的问题。

## 参考文献

- 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
- [2] Bevis M, Businger S, Chiswell S R, et al. GPS meteorology: Mapping zenith wet delays onto precipitable water. J Appl Meteor.1994, 33: 379-386
- [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
   Xiong Yongqing. The possibility of direct estimation of the absolute precipitable water using two GPS receivers. Acta Meteor Sinica (in Chinese),1999,57(5):632-639

- 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
- [5] 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
- [6] Guo Y-R, Kuo Y-H, Dudhia J, et al. Four-dimensional variational data assimilation of heterogeneous mesoscale observations for a strong case. Mon Wea Rev, 2000, 128: 619 -642
- [7] Falvey M, Bevan J. The impact of GPS precipitable water assimilation on mesoscale model retrievals of orographic rainfall during SALPEX'96. Mon Wea Rev, 2002, 130, 2874-2888
- [8] Smith T, Benjamin S G, Gulman S I. Impact of GPS water vapor data on RUC severe weather forecasts. Preprints, 21st Conf. on Severe Local Storms, San Antonio. TX, Amer Meteor Soc, 2002. J43-J46
- [9] Tomassini M, Gendt G, Dick G M, et al. Monitoring of inte-

grated water vapor from ground-based GPS observations and their assimilation in a limited-area NWP model. Phy Chem Earth(A), 2002, 27: 341-346

- [10] 袁招洪,丁金才,陈敏. GPS资料应用于中尺度数值预报模式的初步研究. 气象学报,2004,62(2):200~212
   Yuan Zhaohong, Ding Jincai, Chen Min. Preliminary study on applying GPS observations to mesoscale numerical weather prediction model. Acta Meteor Sinica (in Chinese),2004,62 (2):200-212
- [11] Davis J L, Herring T A, Shapiro I I, et al. Geodesy of radio interferometry: Effects of atmospheric modeling errors on estimates of baselins length. Radio Sci, 1985, 20: 1593-1607
- [12] 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
- [13] Parrish D F, Derber J C. The National Meteorological Center 's spectral statistical interpolation analysis system. Mon Wea Rev, 1992, 120: 1747-1763

# VARIATIONAL ASSIMILATION OF GPS PRECIPITABLE WATER INTO MM5 MESOSCALE MODEL

#### Yuan Zhaohong

(Shanghai Meteorological Bureau, Shanghai 200030)

#### Abstract

The GPS precipitable water (PW) from 13 GPS sites in the Yangtze delta is explored to investigate the tune of background errors and the three dimensional variational assimilation of MM5 on rainfall event occurred from June 27 to 28,2002. The results show: Background errors (BE) play a key role in the three dimensional variational assimilation of MM5. The horizontal scalelength of model variables (u, v, T, p and q) is closely related to the average time of NMC technique. The scalelength of model variables is different for each other, which value is associated with the vertical height of the variable on the MM5 level. The BE calculated by NMC technique reach the true BE more closely than that provided by MM5-3DVAR system.

GPS PW data can be assimulated into MM5 by using 3DVAR technique. After GPS PW data assimulation, the initial humidity field can be reanalyzed while the initial temperature, pressure and wind fields also being modified. 3DVAR of GPS PW is benefitial to reduce analysis bias of PW in initial fields which can result in restraining PW prediction bias during the earlier period (3-6 h) of model integration so as to improve PW prediction. The PW prediction improvement is related to the GPS receiver location in the area covered by GPS networks. By comparing the results with no GPS IPW assimilation, we find that GPS PW assimilation can increase the accuracy of 6 h and 24 h accumulated precipitation prediction so as to improve the precipitation prediction ability of MM5. On the whole, GPS PW data assimilation will improve the precipitation of MM5.

However, there are several difficulties that will impact the GPS assimilation, which are how to get the true background errors and GPS PW errors at real time. It will be further researches to develop a new technique to calculate more reasonable background errors and GPS PW errors.

Key words: GPS, Precipitable water(PW), 3DVAR, MM5.