

bbGPS/PWV 资料三维变分同化改进 MM5 降水预报连续试验的评估

丁金才^{1,2} 袁招洪³ 杨引明² 叶其欣² 仇 欣⁴ 江 飞⁴

(1. 上海中心气象台, 200030; 2. 上海市卫星遥感和测量中心;
3. 上海市气象局; 4. 南京大学大气科学系)

提 要: 利用区域地基 GPS 网反演的高时空密度的大气垂直方向水汽总量, 也称为可降水量(PWV), 可大大弥补常规探空探测水汽资料的不足。为了全面评估区域 GPS 网 PWV 资料同化对业务数值天气预报改进程度的目的, 在个例研究分析的基础上, 进行了连续 38 天的 GPS/PWV 资料三维同化(3D-Var)改进数值业务预报的试验。研究方法是根据长江三角洲地区 GPS 气象网在 2002 年梅雨和盛夏季节观测的 PWV 资料, 通过三维变分同化建立中尺度数值预报模式 MM5 的初始场, 逐日作出长江三角洲地区 24 小时的降水量预报。以 6 小时累积雨量对象, 与未同化 GPS/PWV 资料的 MM5 的相应预报比较, 通过多种评分方法, 评估了 GPS/PWV 资料改进 MM5 降水预报的效果。结果表明 GPS/PWV 资料同化后的 MM5 降水预报能力在大部分时间和大部分地区都有所提高, 主要是伪击率有较明显的下降, 对小范围降水预报的改进更为明显。预报明显改进的区域恰好位于 GPS 站填补常规探空站间距较大的地区。

关键词: 全球定位系统(GPS) 可降水量(PWV) 三维变分同化(3D-Var) MM5 数值预报

Evaluation of the Continuous Experiment of 3-Dimensional Variation Assimilation of GPS/PWV Data into MM5 Model to Improve the Precipitation Forecasts

Ding Jincai^{1,2} Yuan Zhaohong³ Yang Yinming² Ye Qixin² Qou Xin⁴ Jiang Fei⁴

(1. Shanghai Meteorological Center, 200030; 2. Shanghai Satellite Remote and Measurement Application Center;
3. Shanghai Meteorological Bureau; 4. The Atmospheric Science Department, Nanjing University)

Abstract: The vertical integrated atmospheric moisture, or the precipitable water vapor

本文得到中国科学院知识创新项目(kjcx2-sw-t1-3)和上海市科委攻关课题(032512029)的资助。

收稿日期: 2006 年 12 月 6 日; 修定稿日期: 2007 年 4 月 15 日

(PWV) with high temporal and spatial resolution retrieved from a ground-based GPS network can supply the gap of the conventional radiosoundings. In order to evaluate the improvement of the GPS/PWV data assimilating to operational numerical forecasts, a continuous experiment of 3-dimensional variation assimilation (3D-Var) of GPS/PWV data into MM5 model is conducted. Through the 3D-Var assimilation of GPS/PWV data, the initial field of MM5 model is built at 20:00 every day, and the hourly rainfalls over the Yangtze River Delta area are forecasted for 24 hours. Comparing with the forecasted 6 hours accumulative rainfalls without GPS/PWV data assimilation, the improvement effects of the MM5 precipitation forecasts with GPS/PWV data assimilation are evaluated by several test methods. The results show that the MM5 precipitation forecasts with GPS/PWV data assimilation are totally improved in the most days and most stations, especially in the days with smaller area of precipitation. The improvement of precipitation forecast mainly attributes to the significant decrease of the percent of false detection. The areas where the precipitation forecasts are improved significantly coincide in the area with sparser regular radiosounding data.

Key Words: Global Positioning System (GPS) precipitable water vapor (PWV) 3-dimensional variation assimilation (3D-Var) MM5 numerical prediction

引 言

湿度是大气过程中一个高度可变的参数,它在很大的时空尺度范围内对天气发挥关键的作用。目前常规探空资料获得的大气中的水汽资料,由于站点稀疏、观测时次少,使中尺度数值预报模式分析的水汽初始场与实际情况差异较大,影响了数值天气预报精度的提高。近年来,利用地基 GPS 网观测到的 GPS 卫星信号的延迟量来反演大气中可降水量(PWV)的技术已发展成一个遥测大气水汽的新方法^[1-3]。由于 GPS 资料有高精度、高时空分辨率和低成本等优点,弥补了常规探空对大气水汽观测的不足,对提高灾害性天气的监测和预报能力,改进数值天气预报精度可发挥重要作用。目前,世界上许多国家和地区都建立了地基 GPS 网,我国的北京和上海等省市也相继建立了区域 GPS 网,并投入了业务运转。在全国范围内建立区域 GPS 网应用于气象业务将成为一个重要的发展趋势。许多个例研究已显示可降水量资

料同化入中尺度数值预报模式,可改进模式的预报能力^[4-7]。

但是要使区域 GPS 网的 PWV 资料应用于业务数值天气预报,还必须通过大样本的连续试验来确认。为此,利用长江三角洲地区 GPS 网在 2002 年梅雨和盛夏季节的连续 30 多天的 PWV 进行了三维变分同化改进数值天气预报的试验和评估,为 GPS 网的观测资料应用于业务数值天气预报提供依据。研究方法是根据有 14 个 GPS 基准站组成的长江三角洲地区 GPS 网在 2002 年 6 月 18 日到 7 月 30 日观测的 PWV 资料,通过三维变分同化(3D-Var),连续形成逐日 20 时的中尺度数值预报模式 MM5 的初始场,预报 24 小时,输出长江三角洲地区每天 4 个时段的 6 小时累积雨量的预报,并与未同化 GPS/PWV 资料的 MM5 的相应降水预报进行比较。利用临界成功指数(CSI)、正确率(SV)、命中率(POD)、伪警率(FAR)和伪击率(POFD)等多种评分方法,对 GPS/PWV 资料的三维变分同化改进 MM5 降水预报的效果进行评估,结论是 GPS/PWV 资料的三

维变分同化对数值天气预报在一天的 4 个时段的降水预报都有不同程度的改进,主要是伪击率有较明显的下降,对小范围降水预报的改进更为明显。预报明显改进的区域恰好位于 GPS 站填补常规探空站间距较大的地区。

1 长江三角洲 GPS 网和可降水量的反演

长江三角洲地区 GPS 网由 14 个 GPS 基准站组成,覆盖范围在 $29^{\circ}\sim 33^{\circ}\text{N}$ 、 $118^{\circ}\sim 122^{\circ}\text{E}$ 之间。站点分布如图 1 所示,上海地区有 5 个站,平均间距为 23km;江苏有 4 个站,安徽 3 个站,浙江 2 个站,平均间距约 110km。该网在 2002 年 6 月建成,并投入业务运转,可每 30 分钟提供一次长江三角洲地区的可降水量(PWV)资料和相关产品^[8]。

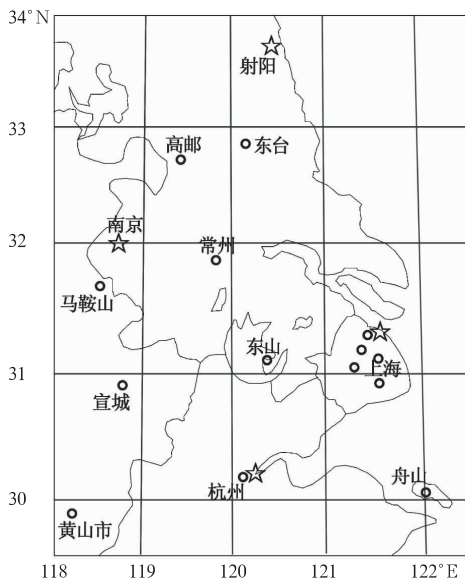


图 1 长江三角洲地区 GPS 网点分布图

用 GPS 资料计算大气水汽的垂直积分,即可降水量的方法由 Bevis 等在 1992 年提出^[1-3]。GPS 卫星向地面发射的无线电信号,在大气中传播时被地球的电离层和中性大气所延迟,其中电离层延迟量可采用双频技术得以消除。余下的中性大气天顶延迟

(ΔL)可分为由水汽产生的湿延迟(ΔL_w)和其他大气成分产生的干延迟或静力延迟(ΔL_h)。利用 GPS 站测得的 GPS 信号的天顶延迟量可反演出大气可降水量 PWV。具体反演方法已在 Bevis^[1-2], Rocleen^[3], 丁金才^[8]和袁招洪^[7]等的文献中有详细介绍,不在这里重复。PWV 的定义是单位底面积垂直空气柱积分的水汽含量,通常转换成等效液态水柱的高度,单位为 mm。

2 试验设置

2.1 试验时期和资料

2002 年 6 月 18 日到 7 月 30 日的连续试验时段,包括了长江三角洲地区梅雨和盛夏的两个重要季节。2002 年长江三角洲地区在 6 月 19 日入梅,7 月 10 日出梅,梅雨持续了 22 天。大致可以分为 5 个阶段,雨带在长江中下游地区南北摆动,其中在 7 月 3—5 日的第四阶段受威马逊台风影响在华东沿海地区造成连续降水。7 月 10 日雨带北抬至淮河流域,长江三角洲地区出梅,进入盛夏。梅雨期降水范围较大,时有大一暴雨发生。7 月 10 日出梅后以午后至傍晚的局地阵性降水为主。

为了保证试验用的 GPS 网的 PWV 资料的质量,采用 IGS 的精密卫星轨道进行了重计算。并以与 GPS 站位于同一个观测场内的浙江省杭州探空站作为比较基准,统计出 GPS/PWV 的平均偏差为 1.2mm,均方误差为 3.1mm,相对误差 8.8%,二者的相关系数达到 0.99,说明根据 GPS 网观测资料反演的 PWV 与探空观测的 PWV 很接近。在 2002 年 6 月 18 日到 7 月 30 日的 43 天中有 5 天由于 GPS 网的故障而缺损,连续试验用的样本有 38 天。

选取这段试验时间的理由之二是在 2002 年 6—9 月实施了加密观测试验,获得

长江三角洲地区迄今为止最完整的 91 个气象站的每小时雨量观测资料,可保证评估结果的可靠性。预报验证利用 6 小时的累计雨量。每日 20 时的地面、高空资料取自 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。

2.2 试验方案设置

2.2.1 试验模式

本试验选用业务用的 MM5 模式作为中尺度试验模式,垂直 27 层,模式双重嵌套,水平网格距分别为 45km 和 15km,格点数分别为 87×95 和 52×62 。细网格覆盖了长江三角洲 GPS 观测网,以细网格输出的雨量预报结果进行评估。模式湿物理过程采用含冰相过程的混合项参数化方案,积云参数化方案选用 BM 方案。利用 MM5 模式提供的 RE-GRID 和 INTERPF 模块将 NCEP 的 AVN 全球模式客观分析场生成 MM5 初估场,该初估场作为 MM5 的 3D-Var 系统的输入。模式积分时间步长为 120 秒。变分同化系统选用由 NCAR 开发,并最终为 WRF 模式使用的三维变分同化系统,即 MM5-3DVAR。试验中 GPS 可降水量的测量误差取为 3mm;地面、高空观测误差采用欧洲中期天气预报中心变分同化方案所使用的值,用 NMC 方法计算出背景场的误差协方差矩阵为基础,与 MM5-3DVAR 系统提供的背景误差比较后进行调整背景误差^[9]。

2.2.2 试验方案

本试验分为 2 个部分,一部分是 3DVAR-NOPWV 方案,用 3D-Var 技术仅用地面和高空观测资料进行同化,形成 MM5 模式 20 时的初始场,进行降水预报。无 GPS/PWV 资料。另一部分是 3DVAR-PWV 方案,用 3D-Var 技术用地面,高空观测资料和 GPS/PWV 资料进行同化,形成 MM5 模式 20 时的初始场,进行降水预报。

两个方案的模式参数如前所述。

2.2.3 试验对象

模式预报 24 个小时,每积分 6 小时输出该 6 小时的累计降水场,并插值到 91 个气象站点。规定 20 时到次日 02 时为第一个 6 小时,次日 02—08 时为第二个 6 小时,依次类推,一天共有 4 个 6 小时的时段。然后,加入 GPS/PWV 资料进行上述同样的三维变分同化分析,输出同样站点的 6 小时累计降水场。以各时段的 6 小时雨量预报作为比较和评估的对象。

2.3 试验基础

上述的试验方案是在袁招洪^[7]和丁金才^[8]进行的对 2002 年 6 月 23—24 日和 27 日个例试验的基础上设置的。首先对 GPS/PWVZ 资料同化前后的模式初始场进行了比较,发现 GPS 资料同化前 MM5 模式初始场对静力延迟有较好的描述能力,但对湿延迟和可降水量的描述还存在较大误差。MM5 模式对湿延迟的预报能力明显低于对静力延迟的预报能力。用三维变分同化 GPS 可降水量资料不仅对 MM5 模式湿度初始场有明显调整,而且使初始气压、温度和风场也能得到相应的调整。在模式积分的 6~18 小时 GPS/PWV 三维变分同化试验对累计降水的预报都优于 Cressman 客观分析试验。

GPS 可降水量资料的 Nudging 同化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改善程度影响不大。因此,连续试验采用了三维变分技术同化 GPS 可降水量资料。

3 评估方法

把模式预报的 91 个站点 6 小时累计降水值,按有无降水($R_6 \geq 0.1\text{mm}$)和有无中等以上降水($R_6 \geq 5.0\text{mm}$)2 个等级与相应的观

测雨量进行比较。观测有、预报也有的预报正确的站点数记为 N_{11} ;观测无、预报也有的预报正确的站点数记为 N_{22} ;观测无、预报有的空报的站点数记为 N_{21} ;观测有、预报无的漏报的站点数记为 N_{12} 。

各评估方法的定义如下^[10]:

临界成功指数 $CSI = N_{11} / (N_{11} + N_{12} + N_{21})$ (1)

正确率 $V_S = (N_{11} + N_{22}) / (N_{11} + N_{12} + N_{21} + N_{22})$ (2)

击中率 $POD = N_{11} / (N_{11} + N_{12})$ (3)

伪警率 $FAR = N_{21} / (N_{11} + N_{21})$ (4)

伪击率 $POFD = N_{21} / (N_{22} + N_{21})$, (5)

然后用 38 天样本的平均评分值来评估 GPS/PWV 资料同化前后的 MM5 预报能力的差别。各评分方法从不同侧面反映出模式的预报能力。

4 连续试验评估结果

4.1 几种评分方法的评估

CSI 是目前最常用的预报评分方法,它反映了预报有雨正确的能力。表 1 列出了 GPS/PWV 资料同化前后的 MM5 降水预报的 4 个时段的 CSI 评分结果以及二者的差别。可见 GPS/PWV 资料同化后的 MM5 降水预报技巧能力都有所提高。但由于 MM5 的降水预报平均能力不高,GPS/PWV 资料同化前 MM5 的有无降水预报的 CSI 评分在 0.186~0.226 的范围内,变化幅度很小。而中等以上降水预报的 CSI 评分更低,在 0.056~0.121 低值内摆动。因此,以下的评分讨论以有无降水的预报为主。同时,从表 1 中可见,GPS/PWV 资料同化后 MM5 的有无降水和中等以上降水的预报能力变化都小于 0.006,MM5 降水预报技巧虽有提高,但提高不明显,这可能与 MM5 的本身降水

预报的 CSI 评分很低有关。

表 1 GPS/PWV 资料同化前后 MM5 降水预报的 4 个时段的 CSI 评分(38 天平均)

降水量等级	$R_6 \geq 0.1\text{mm}$			$R_6 \geq 5.0\text{mm}$		
	NO-GPS	GPS	DCSI	NO-GPS	GPS	DCSI
时段 1	0.186	0.192	+0.006	0.083	0.087	+0.004
时段 2	0.213	0.213	0.0	0.082	0.084	+0.002
时段 3	0.226	0.229	+0.003	0.121	0.124	+0.003
时段 4	0.216	0.215	-0.001	0.056	0.045	-0.011

表 2 给出了 POD 、 FAR 和 $POFD$ 的评分结果。击中率 POD 反映的是在观测有雨的总次数中预报有雨的次数所占的百分比,后 12 小时的 POD 高于前 12 小时。在 GPS/PWV 资料同化后,第 4 时段的 POD 有较明显改进,但第 1 和第 2 时段的 POD 反而有所降低。伪警率 FAR 反映的是在预报有雨的总次数中预报失败次数所占的百分比,在 0.702~0.751 的较高值范围内变化,说明了 MM5 的本身预报的伪警率较高。在 GPS/PWV 资料同化后, FAR 的变化都小于 0.008,表示 GPS/PWV 资料同化对伪警率基本没有影响。伪击率 $POFD$ 反映的是在观测无雨的总次数中预报失败次数所占的百分比,它明显小于 FAR 。综合上述分析可见,MM5 的本身预报有雨能力 CSI 较低的原因主要是伪警率较高造成的,MM5 有过分预报的倾向。值得注意的是在 GPS/PWV 资料同化后,第 1~3 时段的 $POFD$ 降低了 0.03 以上,尤其在第 3 时段的 $POFD$ 降低了 0.1 以上,变化幅度比 CSI 、 POD 和 FAR 几乎大一个量级。说明 GPS/PWV 资料同化后对 MM5 降水预报的改进主要体现在降低伪击率 $POFD$ 方面,因此,单用 CSI 方法不能全面评估出 GPS/PWV 资料同化后对 MM5 降水预报的改进效果。

表 2 GPS/PWV 资料同化前后 MM5 模式预报的 4 个时段有无降水的 POD、FAR 和 POFD 的评分结果以及二者的差别(38 天平均)

评分方法	POD			FAR			POFD		
	NO-GPS	GPS	DPOD	NO-GPS	GPS	DFAR	NO-GPS	GPS	DPOFD
时段 1	0.463	0.443	-0.020	0.745	0.737	-0.008	0.287	0.257	-0.030
时段 2	0.475	0.445	-0.030	0.702	0.698	-0.004	0.354	0.311	-0.043
时段 3	0.733	0.741	+0.008	0.748	0.746	-0.002	0.506	0.485	-0.121
时段 4	0.607	0.643	+0.036	0.751	0.753	+0.002	0.474	0.466	-0.008

CSI 评分只反映了预报有雨的正确率。事实上在试验期的 38 天中有 28 天长江三角洲地区有雨的站点数小于 12 个,也就是说,上述的 CSI 评分没有反映出更多的预报无雨的能力。下面将引进正确率 V_s 的评分方法,它是预报有雨和无雨的正确次数与总预报次数之比,能全面评估 MM5 的预报能力。当然, V_s 评分方法也包括了气候概率持续预报的正确率,不能完全反映出预报技巧。但是在此是利用 GPS/PWV 资料同化前后 MM5 降水预报的 V_s 评分值的差来进行评估的,消去了共同的气候概率持续预报的正确率,因此能真实反映出二者的预报技巧的差别。

表 3 列出了 GPS/PWV 资料同化前后 MM5 模式预报的 4 个时段降水的 V_s 评分值以及二者的差别。 V_s 的值在 0.628~0.874 范围内,比 CSI 值高得多,说明预报无雨的正确率占了总预报正确率的大部分。GPS/PWV 资料同化前的 MM5 对有无降水的预报正确率随预报时段增加呈线性递减。与上述其他 CSI 和 FAR 等评分结果不同的是,GPS/PWV 资料同化后 MM5 对有无降水的预报正确率在 4 个时段都有大于 0.01 以上的明显增加,预报正确率的增加值随预报时段增加呈线性递减。在第 1 和第 2 时段的预报正确率增加 0.02 以上。但是对 $R_6 \geq 5.0\text{mm}$ 的降水预报,GPS/PWV 资料同化后 MM5 的预报正确率只有在第 1 时段有所增加,其他预报时段的预报能力略有减少。下

面将只对第 1 时段有无降水的预报正确率变化作进一步分析。

表 3 GPS/PWV 资料同化前后 MM5 预报的 4 个时段降水的 V_s 评分值(38 天平均)

	$R_6 \geq 0.1\text{mm}$			$R_6 \geq 5.0\text{mm}$		
	NO-GPS	GPS	DV_s	NO-GPS	GPS	DV_s
时段 1	0.763	0.789	+0.026	0.864	0.876	+0.012
时段 2	0.737	0.759	+0.022	0.866	0.864	-0.002
时段 3	0.640	0.654	+0.014	0.816	0.816	0.0
时段 4	0.628	0.638	+0.010	0.874	0.857	-0.017

图 2 显示了 GPS/PWV 资料同化后的 MM5 对第 1 时段有无降水的预报正确改进率与降水区域大小的关系。由于长江三角洲地区的 91 个气象站基本是均匀分布的,因此可以以某天有降水的站点数来表示长江三角洲地区的降水区域大小,图中以横坐标表示。纵坐标表示预报正确改进率(I_{m-v_s}),它的定义是某一天的同化 GPS/PWV 后 MM5 预报正确的站点数减去同化前的预报正确的站点数,其差值再除以同化前的 MM5 预报正确的站点数。

$$I_{m-v_s} = \{[(N_{11} + N_{22})_{GPS} - (N_{11} + N_{22})] / (N_{11} + N_{22})\} \times 100\% \quad (6)$$

图 2a 显示 38 天的试验样本中有 26 天位于零线以上,只有 5 天在零线以下,说明 GPS/PWV 资料同化后 MM5 预报有无降水的正确率有 68% 的天数是改进的。但是,点子分布比较分散,改进率的多少与降水区域大小没有一定的定量关系。然而,从定性来看,38 个样本点有 28 个分布在虚线的左边

(该天该时段发生降水的站点数少于 12, 即小于整个长江三角洲面积的 14%), 仅有 10 个样本点分布在虚线的右边。图 2b 显示的小范围降水的情况下, 28 个样本点中仅有 3 个样本点落到 0 线以下, 图中点划线是 28 个样本正确预报改进率的平均值, 约为 5.6%; 而对于降水的站点数大于 12 的 10 个样本, 正确预报的平均改进率为 2.4%。可以认为同化 GPS/PWV 资料后 MM5 降水预报能力, 在小范围降水的情况下的改进率优于在大范围降水的情况, 其原因待进一步的研究。

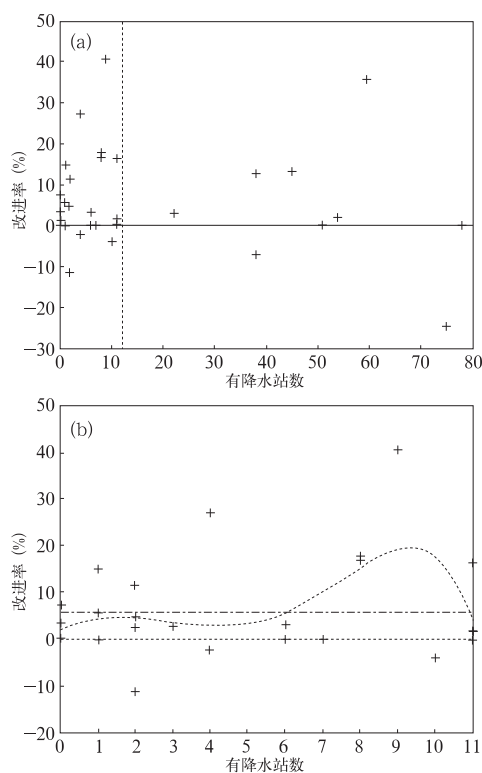


图 2 GPS/PWV 资料同化后的 MM5 对第 1 时段有无降水的预报正确改进率随发生降水的站点数的分布

- a. 全部样本(38 个);
b. 发生降水的站点数小于 12 的样本(28 个)

4.2 预报正确率明显改进的区域分布

上述主要对 GPS/PWV 资料改进 MM5 降水预报从时间序列的平均效果进行讨论的。下面将以第 1 时段的有无降水的预报为

例, 分析预报正确率明显改进的区域分布情况。图 3 显示的是各站 GPS/PWV 资料同化后 MM5 在 38 样本天中的预报正确天数比同化前预报正确天数增加的次数。

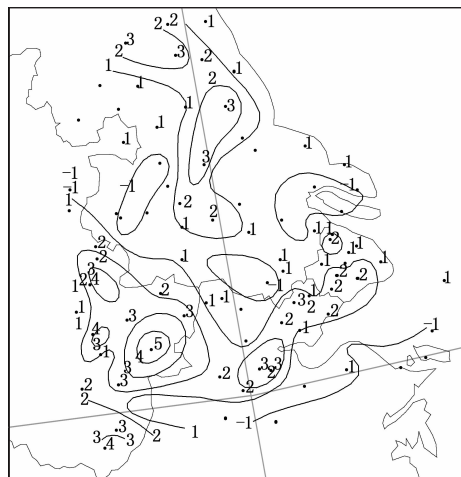


图 3 GPS/PWV 资料同化后降水预报正确的增加次数区域分布
根据 91 个站点 38 天的样本统计, 图中没有数字的站点表示增加次数为 0

从图 3 可见, 91 个站点中只有个别点为负值, 大部分站点的预报正确天数是增加的, 说明 GPS/PWV 资料同化后 MM5 的降水预报不仅在大部分时间, 而且在长江三角洲的大部分地区都有所改进。其中有 3 个区域预报正确天数增加较明显, 最明显的是在浙江西部安徽东南部的山地地区, 预报正确的增加天数在 3 天以上, 最多 5 天, 比未同化 GPS/PWV 资料的预报正确天数增加了约 20%。如图 1 所示的, 长江三角洲地区只有 4 个常规探空站, 在南京和杭州 2 个探空站之间留有较大空隙。而且浙西皖南山区西部的一个探空站远在 300 km 外的安徽省安庆市, 探空提供的水汽资料在这个地区存在的空隙最大, 使在 GPS/PWV 资料同化前 MM5 的降水预报正确天数在那里相对最低。黄山市、宣城和马鞍山 3 个 GPS 站的 PWV 资料同化后, 正好弥补了这个区域的探空资料的空隙, 使 MM5 的降水预报能力在该地区有较明显的提

高。其次是江苏北部地区预报正确天数也有明显增加,正好对应高邮和东台 2 个 GPS 站弥补了射阳和南京 2 个探空站之间的水汽资料空隙。另外,在上海南部到杭州一带预报正确天数也有所增加,这与这一地区 GPS 站密度较大有关。

从上述分析可见,同化 GPS/PWV 资料后 MM5 预报降水的正确率在整个长江三角洲区域都有所提高。尤其在常规探空站网间隙较大地区, GPS 站填补的水汽资料使 MM5 预报降水能力的改进较明显。

5 结 论

通过连续 38 天的区域 GPS/PWV 资料三维变分同化改善 MM5 预报降水能力的试验和评估,得出以下几个结论:

(1) GPS/PWV 资料同化后 MM5 的降水预报正确率在 68% 的天数和大部分地区都有所改进,预报正确率的改进效果随预报时段增加也呈线性递减。对有无降水的预报正确率在前 12 小时增加 0.022~0.026,在后 12 小时增加 0.010~0.014。对 $R_6 \geq 5.0\text{mm}$ 的中等的降水预报,预报正确率基本没有改进。

(2) GPS/PWV 资料同化后对 MM5 降水预报能力的改进主要体现在没有降水发生的情况下的伪击率(POFD)明显减少,对击中率和伪警率基本没有改进。因此,必须用多种 TS 评分方法才能全面评估出 GPS/PWV 资料同化后对 MM5 预报改进的效果。

(3) GPS/PWV 资料同化后 MM5 对小范围降水的预报能力的改进率优于大范围降水的预报。在降水范围小于长江三角洲面积的 14% 的情况下,有无降水的正确预报改进率平均为 5.6%;而对于降水范围大于长江三角洲面积 14% 的情况下,有无降水的正确预报的改进率平均为 2.4%。

(4) 同化 GPS/PWV 资料后 MM5 预报降水的正确率在长江三角洲区域大部分地区都有所提高,尤其在常规探空站间隙较大的地区,如长江三角洲区域的西南山地, GPS 站填补的水汽资料使 MM5 预报降水能力的改进最为明显。

感谢:本文中插图由奚红制作和修改,特此表示感谢。

参考文献

- [1] Bevis, M., S. Businger, T. A. Herring, et al. GPS meteorology: remote sensing of atmospheric water vapor using the global positioning system[J]. J. Geophys. Res., 1992, 97:15787-15801.
- [2] Bevis M, Businger S, Chiswell S, et al. GPS Meteorology: mapping zenith wet delays onto precipitable water[J]. Journal of Applied Meteorology, 1994, 33: 379-386.
- [3] Rocken, C., T. Van Hove, J. Johnson, et al. GPS/STORM-GPS sensing of atmospheric water vapor for meteorology[J]. Journal of Geophysical Research, 1995, 12: 468-478.
- [4] De Ponte, M., and X. Zou, A case study of the variational assimilation of GPS zenith delay observation into a mesoscale model[J]. J. Appl. Meteor., 2001, 40,1559-1576.
- [5] Guo, Y. - R., Y. - H. Kuo, J. Dudhia, et al. Four-dimensional variational data assimilation of heterogeneous mesoscale observations for a strong case [J]. Mon. Wea. Rev., 2000, 128:619-642.
- [6] Kuo, Y. - H., Y. - R. Guo, and E. R. Westwater. Assimilation of precipitable water vapor into mesoscale numerical model [J]. J. Appl. Meteor., 1993, 121, 1215-1238.
- [7] 招红, 丁金才, 陈敏. GPS 观测资料应用于中尺度数值模式的初步研究[J]. 气象学报, 2004, 62(2):200-212.
- [8] 金才, 叶其欣. 长江三角洲地区近实时 GPS 气象网[J]. 气象, 2003, 29(6):26-29.
- [9] 袁招洪. GPS 可降水量资料应用于 MM5 模式的变分同化试验[J]. 气象学报, 2005, 63(4):391-404.
- [10] 丁金才. 天气预报评分方法评述[J]. 南京气象学院学报, 1995, 18:143-149.