

Song S L., Zhu W Y., Ding J C., et al. Real time monitoring of PWV from SGCAN and its application test in numerical weather forecast. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2004, 47(4): 631 ~ 638

上海 GPS 综合应用网对可降水汽量的实时监测 及其改进数值预报初始场的试验

宋淑丽¹ 朱文耀¹ 丁金才² 廖新浩¹ 程宗颐¹ 叶其欣²

¹ 中国科学院上海天文台, 上海 200030

² 上海中心气象台, 上海 200030

摘要 分析了 2002 年夏季上海 GPS 综合应用网(简称 SGCAN)的观测数据,实时处理中直接利用 IGS(International GPS Service)超快速产品 IGU(the Ultrarapid orbit of IGS)轨道,在长基线辅助下考虑海潮的影响,得到了可靠的可降水汽量(简称 PWV)序列,监测结果与加密的 Radiosonde 观测比较,偏差为 2mm 左右. 与 MM5 预报可降水量的比较说明 GPS 监测结果可以作为检验数值预报质量的工具之一. 2002 年夏季 SGCAN 监测的 PWV 时空变化过程反映了长江三角洲地区从西南到东北的详细入梅雨过程和特点,以及整个梅雨季节雨带在江淮地区来回摆动的情况. 一小时雨量与 GPS/PWV 锋值的对应关系统计表明 GPS/PWV 对雷暴雨具有一定的短期预报特性. 利用 Cressman 分析方法把 GPS/PWV 插值到中尺度数值预报模式初始场的各个格点上,改进了数值预报初始湿度场的精度,提高了中尺度数值预报的准确性,反映了 GPS/PWV 促进雷暴雨数值预报能力的潜力.

关键词 上海 GPS 综合应用网 可降水汽量 梅雨季节 数值预报

文章编号 0001-5733(2004)04-0631-08 中图分类号 P412 收稿日期 2003-03-04,2004-01-23收修定稿

REAL TIME MONITORING OF PWV FROM SGCAN AND ITS APPLICATION TEST IN NUMERICAL WEATHER FORECAST

SONG Shu-Li¹ ZHU Wen-Yao¹ DING Jin-Cai² LIAO Xin-Hao¹ CHENG Zhong-Yi¹ YE Qi-Xin²

¹ Chinese Academy of Sciences, Shanghai Astronomical Observatory, Shanghai 200030, China

² Shanghai Central Weather Observatory, Shanghai 200030, China

Abstract GPS data from Shanghai GPS Comprehensive and Application Network(SGCAN) in the summer of 2002 are analyzed. The Ultra-rapid orbit of IGS(IGU) is used directly in real-time processing. Reliable Precipitable Water Vapor (PWV) series can be obtained with the assistant of remote stations. Considering the effect of ocean tide, the accuracy of PWV can be improved. The difference between GPS/PWV and Radiosonde observations is about 2mm. Comparison between the outputs of MM5 and GPS/PWV shows that GPS can be regarded as one means to real-time check up the result of MM5 numerical prediction. Continuous GPS/PWV series in the whole Meiyu season reflects the changing processes of PWV in detail before and after the onset of the Meiyu Season in the Yangtz River Delta in 2002 summer. The variations of GPS/PWV show that the onset of the Meiyu season was from southwest to northeast and completed in about 7~8 hours. The rainband moved

基金项目 国家自然科学基金项目(40174009,10133010),中国科学院知识创新重要方向项目(KICX2-SW-T1),上海科学技术基础发展基金项目(JC14012).

作者简介 宋淑丽,女,1977 年生,博士研究生,主要从事天文地球动力学和 GPS 气象学方面的研究. E-mail:slsong@center.shao.ac.cn

back and forth among the Yangtz River Delta, Huaihe area and the south to the Yangtz river area in the Meiyu season. The statistics of PWV peaks and one-hour rain explain some short-term forecast ability of GPS/PWV for rainstorms. The humidity condition of numerical forecast model is optimized after GPS/PWV being interpolated to the grids of the initial field using the Cressman method. The accuracy of numerical forecast is improved. One example is provided in this paper which shows the potential of GPS/PWV in improving numerical forecast.

Key words Shanghai GPS comprehensive and application network (SGCAN), Precipitable water vapor (PWV), Meiyu season, Numerical weather forecast.

1 引言

大气中水汽的信息对于发展和校正中尺度数值预报模式的初始场是非常重要的,特别是对于水汽时空变化比较激烈的长江三角洲地区.而目前水汽资料主要依靠常规地面观测站和业务探空网来提供,长江三角洲地区只有上海宝山、江苏南京、射阳和浙江杭州 4 个探空站,一般一天只释放两次探空气球,这样低的时空分辨率,很难捕捉空间尺度小于 100km 的中尺度暴雨系统,也很难满足短期预报的要求,而由气象卫星资料直接反演的水汽精度又较低.一系列的实验已经证明地基 GPS 测定的可降水汽量(GPS/PWV)具有与 Radiosonde 和 WVR 相同的精度,其误差小于 $2\text{mm}^{[1,2]}$,这个精度对于在任何条件下、任何时间和任何地区改进天气预报都是足够的,也满足大部分气候研究的要求,并且地基 GPS 可以在任何天气状况下提供高分辨率的连续 PWV 序列^[3].显然上海 GPS 综合应用网是为数值预报提供实时水汽信息的一条新途径,该网由分布在长江三角洲地区的 14 个基准站组成,可以连续 24h 监测大气中水汽的变化,为监测和预报长江三角洲地区梅雨季节的到来以及突发性的暴雨天气提供充足的水汽资料,提高天气预报的准确率.

2 上海地区 GPS 综合应用网及布网原则

SGCAN 是我国第一个应用于气象学研究和应用的 GPS 服务网.该网由 14 个地面 GPS 基准站和一个中心处理站组成,中心处理站设在上海天文台,14 个地面 GPS 基准站分布在以上海为中心的江、浙、皖长江三角洲地区,如图 1 所示.江、浙、皖三省内的 9 个站全设在气象站内,间距 81 ~ 397km,平均间距为 201km.上海地区 5 个站的间距为 13 ~ 37km,平均间距为 23km.其中,上海宝山和浙江杭

州有 Radiosonde 探空站,一般每天 08:00 和 20:00 观测一次,为了研究 GPS 监测结果的可靠性,与 GPS/PWV 进行比对,6、7 月份该网组织了 Radiosonde 和实际降雨量的加密观测,Radiosonde 的加密观测是在每天 02:00 和 14:00 增加两次;实际降雨量的加密观测增加到每小时一次.

该网基准站均配置 ASTECH μ Z 双频 GPS 接收机和 MET3 气象仪器. GPS 观测资料和气象资料由当地计算机每半小时一次按时传输到中心处理站.中心处理站负责接收、处理数据,每半小时计算一次最新的可降水量,并将可降水量实时地自动传输到气象部门.该网可以为上海地区日常地提供高精度、高时空分辨率、全天候、近实时的几乎连续的可降水汽量变化序列,并由此逐步形成一个新的上海地区灾害性天气监测预报系统.

该网已于 2002 年 6 月投入每天 24 小时的连续运行.该网的布网原则,从气象上主要考虑了以下几点需要:(1)影响上海地区的强对流天气大多数从西面和西南方向进入上海^[4],西南气流中水汽的输送和辐合是产生强对流天气的主要原因之一.在黄山(AHHS)、马鞍山(AHMA)、常州(JSCZ)、宣城(JSXC)、东山(JSDS)、杭州(ZHZ)和舟山(ZZS)设点(在舟山设站主要考虑了夏天台风的影响),有利于通过水汽变化监测路径上的强对流天气系统活动,提高监测和预测上海地区中尺度强对流天气(暴雨、冰雹、雷雨大风等)的能力.这是设立该网的最主要目的.(2)另外有一部分强对流天气产生于上海本地,源地主要在浦东和市区东北部,然后向南移动影响其他地区.本地产生的强对流天气特点是尺度小,时间短.因此在上海设立 5 个点,间距 10 ~ 20km,有利于监测和预测这类强对流天气.(3)杭州和上海宝山气象站设有无线电探空站,在这两个站上设 GPS 站的目的之一是要利用这些站的探空资料对 GPS/PWV 资料进行比较和检验,并为层析水汽三维分布工作提供必要的基础.(4)从改进中尺度区域数值预报的初始场及四维同化角度出发,需要

站点分布有一定范围,不宜过分集中在一个小区内.所以该网的 14 个地面 GPS 基准站设在以上海为中心的方圆约 400km² 的地区.

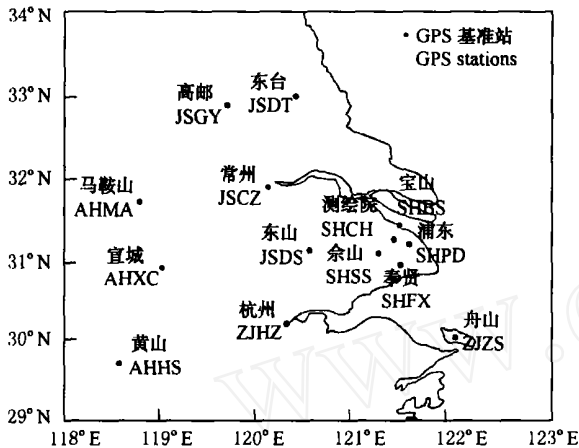


图 1 上海 GPS 综合应用网站点分布图

Fig. 1 Stations distribution of SGCAN

3 区域性地基 GPS 网实时计算 PWV 的要点

我们采用 IGS 的超快速产品 IGU (IGS Ultra rapid products) 轨道和不受卫星钟差影响的双差技术 (GAMIT 软件),对站坐标进行两倍中误差的约束,采用卡尔曼滤波的方法分析了 SGCAN 获取的资料,实时处理时主要考虑的一个问题.

3.1 长基线对获取绝对可靠 PWV 的作用

对于区域性 GPS 网,由于测站间距离较短,天顶延迟的相关性很强,用 GAMIT 等双差技术的软件进行数据处理时,只能获得测站间的相对 PWV,各站的绝对 PWV 是不确定的^[5].对较小的 GPS 网,需用水汽辐射计 WVR 辅助求出 mm 级精度的绝对 PWV,或者在网外引入大于 500 km 的长基线辅助站减小其相关性^[6].上海 GPS 网最长边不超过 400km,为了获得全网绝对 PWV 的变化,我们在数据处理时采取了加长基线辅助站的方法.研究表明加 2~3 个辅助站就能满足要求,为此上海 GPS 综合应用网已把长春、乌鲁木齐和昆明 3 个站(天文系统的 3 个连续运行的 GPS 站)作为该网的辅助站,将实现远程数据的实时传输,以满足 PWV 绝对性和实时性的要求.

3.2 海潮负载的影响

由于海潮负载对测站位移的影响在每一时刻都是不同的,引起的测站高程方向的位移可达 1~2cm^[7].研究表明每 30 min 计算一次 PWV 时,是否

考虑海潮负载,对于靠近海边的浙江和上海各站差别较大,PWV 的最大偏差将近 2mm.所以在实时计算 PWV 时,对沿海的 GPS 网,应该加海潮负载对测站坐标的改正.

3.3 端部效应

GAMIT 软件处理对流层延迟时采用的是分段线性拟合的参数估计法,我们知道任何平滑拟合方法对实际资料处理时都会产生端部效应,以 12h 的平滑窗,每半小时计算一次 PWV 时,也有端部畸变现象,每个平滑窗最后半小时天顶延迟的均方差都很大,天顶延迟偏差平均达 4.5mm,倒数第二个半小时的结果就要好很多.而对于实时数值天气预报来说,最新资料的精度和准确性是最重要的,所以在实际的实时应用当中要把最新半小时的结果删掉,或者采用预测方法适当地延伸资料序列两端外的预测值,以削弱端部效应的影响.

4 监测结果

4.1 GPS/PWV 与 Radiosonde 观测的比较

为了检验 SGCAN 探测的 PWV 的可靠性,我们把长江三角洲地区的上海宝山和浙江杭州两个探空站加密观测资料与 GPS 的观测结果进行对比.宝山的 GPS 站和探空站相距约 3km,杭州的 GPS 站和探空站位于同一观测站内,因此有很好的可比性.图 2 是上海宝山站 6、7 月份 60 天的比较结果,可以看出 GPS 观测结果与探空站的资料符合得较好,对 165 个比对样本的统计表明宝山站 GPS 相对于 Radiosonde 的平均偏差为 -0.02mm,均方差为 2.4mm,所以 GPS 测得的 PWV 能够满足天气预报 2.0~2.5mm 的精度要求^[8],说明本文计算的 PWV 具有很好的可靠性.但美国和欧洲 GPS 观测的 PWV 误差的均方差为 2mm^[9],希望通过更深入的研究能进一步提高 PWV 的精度.

地基 GPS 接收机系统能全天候、连续地监测大气中水汽的变化,与常规地面、高空探测相比,GPS 观测系统有其独特的优势,前面与探空资料的比较验证了其可靠性,所以可以利用 GPS 对大气中水汽的连续监测检验中尺度数值预报模式对降水量的预报能力,从而为了解和改善模式对水汽的预报提供前期知识.MM5 模式是目前比较成熟的中尺度数值预报模式,它采用嵌套的细网格,格距 15km,垂直层 27 层,以每天 20:00 时为起始场,预报 24h.把 MM5 每小时预报的 PWV 与 GPS/PWV 进行比较.图

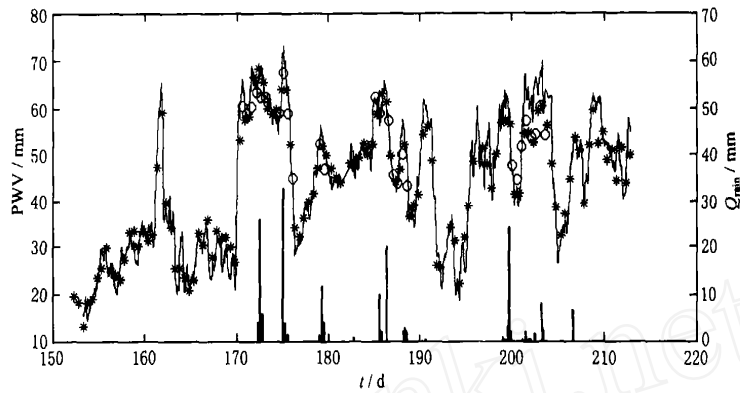


图 2 2002 年 6、7 月份上海宝山站 GPS/PWV 与 Radiosonde 观测的比较

图中实线“—”为 GPS/PWV, “*”为 Radiosonde 常规观测, “o”为 Radiosonde 加密观测, 条形线为每小时降雨量. Q_{rain} 为降雨的标尺, 横坐标为 2002 年年积日第 152~212 d (即 6 月 2 日~7 月 31 日).

Fig. 2 Comparisons between GPS/PWV and Radiosonde observations at Baoshan station in June and July of 2002

“—”is GPS/PWV, “*”is Radiosonde normal observations, “o”is additional Radiosonde observations, bar is rainfall of one hour, left y-coordinate for PWV, right y-coordinate for rain, x-coordinate is the day of 2002, from June 2 to July 31

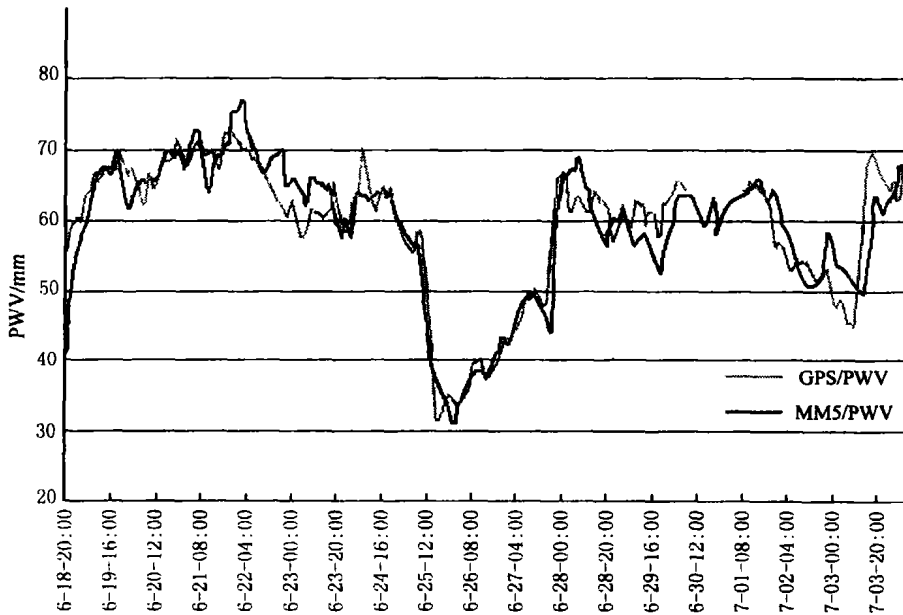


图 3 浙江舟山站 GPS/PWV 与 MMS 模式数值预报结果的比较

Fig. 3 Comparisons between the outputs of MMS and GPS/PWV

3 显示的是浙江舟山站 MMS 模式预报的每小时 PWV 与 GPS 观测值的比较. 可见二者在可降水量大的变化趋势上吻合的比较, 只是模式对可降水量变化的预报还存在相位偏差, 即模式对可降水量增加或减少的预报有提前和滞后的现象. 二者比较平均方差为 4.33mm, 相关系数为 0.94. 说明 GPS/PWV 的序列资料可以作为检验 MMS 预报质量的工具之一. 从图 3 还可以看出, 模式对可降水量的预报一开始就存在偏

差, 可能与模式初始场对湿度场的分析偏差有关, 因此, 利用 GPS 观测资料改善模式初始场对湿度场的分析也许是改善数值预报的有效途径.

4.2 SGCAN 对 2002 年长江三角洲地区梅雨季节的监测

利用连续运行的 SGCAN 14 个基准站的 GPS 观测资料对长江三角洲地区 2002 年的梅雨季节进行了跟踪监测, 每 30min 给出一组 14 个基准站上空可

降水量的变化图像, GPS/PWV 反映了 2002 年梅雨季节各个阶段长江三角洲地区湿度的变化和雨带的摆动, 以及长江三角洲地区入梅的详细过程. 图 4 以其中 7 个台站为例, 显示了 2002 年第 162~192 天长江三角洲地区可降水量的连续变化过程, 采样率为每 30min 一点. 2002 年长江三角洲地区 6 月 19 日 (第 170d) 开始入梅, 7 月 10 号 (第 191d) 出梅. 从图 4A 可以看出, 162~170 天期间, 即入梅以前, 长江三角洲地区各站 PWV 平均在 30mm 左右. 在第 170 天各站 PWV 急剧增加, 在 7~8h 内所有测站上空的可降水汽量均从平均 30mm 急剧上升到 60~70mm, 表明长江三角洲地区梅雨季节的到来是在很短时间内完成的. 图 4a 是图 4A 方框中第 168~171 天入梅前后各站 PWV 的变化情况, 图 4a 表明 PWV 急剧增加的先后顺序是从黄山、马鞍山、舟山到余山、浦东, 最后到高邮和东台, 这反映了长江三角洲地区从安徽、浙江经上海, 到江苏, 自西、南到东、北的入梅过程. 高精度、高时空分辨率的 GPS/PWV 资料反映出了这次入梅的全过程, 这是时空分辨率较低的 Radiosonde 资料所无法反映的.

从图 4A 还可以看出, 各站在第 170 天左右进入梅季后, PWV 一直保持在 60~70mm 达五六天左右, 图中显示第 169~176 天左右 PWV 保持在相当高水

平是梅雨季节来临时一个很明显的特征, 并且从西南到东北这种特征逐渐淡化, 长江以北地区 (东台、高邮) 比长江以南地区持续时间短, 梅季不明显. 在随后梅雨期的各个阶段, 可降水量变化比较大, 分布不均匀, 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. 黄山和余山站的 PWV 比临近站偏少, 认为是由于这两站海拔较高使水汽积分路径缩短造成的. 在持续 20 多天的梅雨季节, 雨带主要在淮河、长江流域和江南来回摆动. 在第一阶段 (第 170~176 天), 随着副热带高压的加强, 雨带跳至长江流域, 如图 4A 和图 5a 所示, 在这期间的第 170~173 天长江三角洲地区的湿度很大, 除了长江以北的东台和高邮站外, 其他各站的 PWV 基本都超过了 60mm. 随后雨带北抬至淮河流域, 图 5b 反映在这期间长江流域的 PWV 也出现了低值过程, 淮河流域的东台、高邮站 PWV 较高. 在第 177~183 天期间雨带主要在江南南部, 图 5c 表明长江流域的湿度较低, 浙江舟山站 PWV 一直较高. 第 184~186 天由于受威马逊台风的影响, 较前一阶段各站的可降水量普遍较大, 且由于台风的影响从东到西逐渐减少, 如图 5d 所示. 随后雨带北抬, 长江三角洲地区出梅. SGCAN 监测的 PWV 的时空变化与梅雨锋的移动是非常一致的, 说

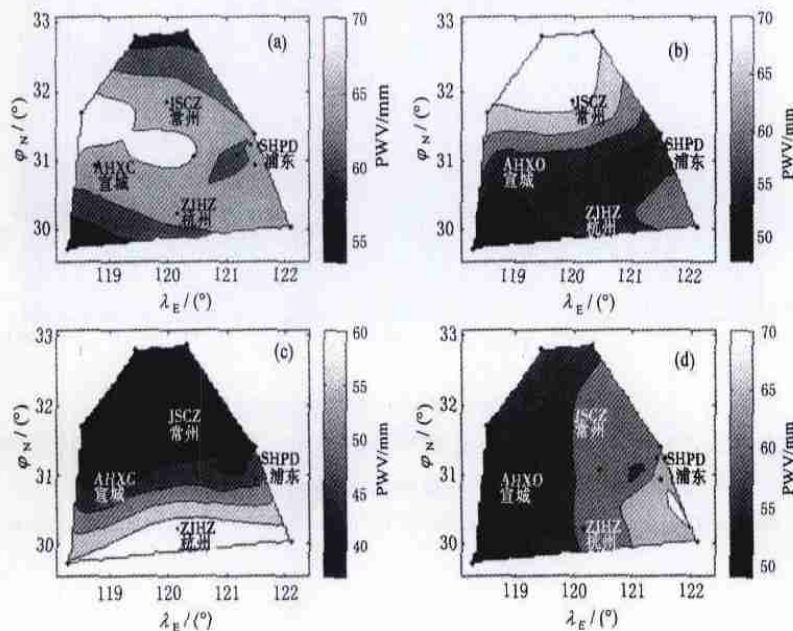


图 5 SGCAN 监测的梅雨季节各个阶段 PWV 的分布

(a) 第一阶段的第 170~173 天, 雨带跳至长江三角洲地区, PWV 急剧增加; (b) 第一阶段的第 174~176 天, 雨带北移, 淮河流域 PWV 偏高; (c) 梅季第二、三阶段, 第 177~183 天, 雨带主要在江南地区, 长江三角洲地区 PWV 出现低值过程; (d) 第四阶段, 第 184~186 天, 受台风影响, PWV 自西向东逐渐增加.

Fig. 5 PWV Distributions in each phase of Meiyu season monitored by SGCAN

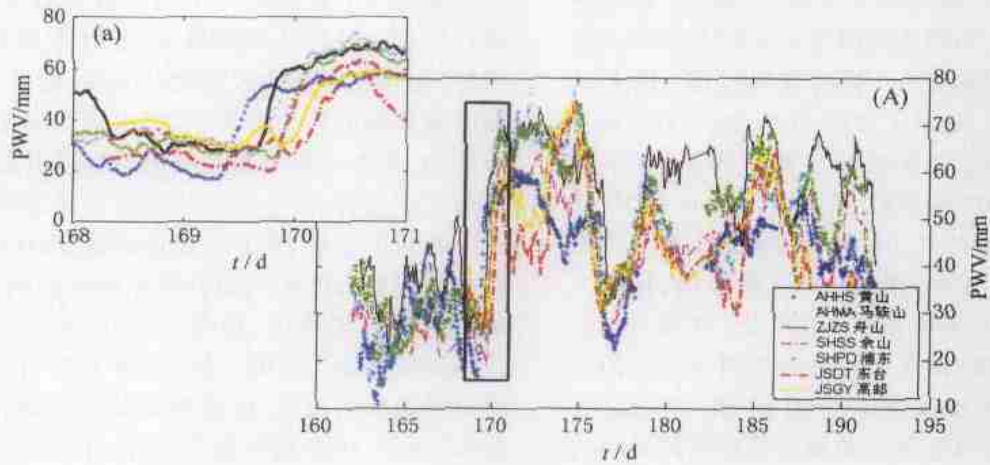


图4 SGCAN监测的2002年长江三角洲地区的梅雨季节
 Fig. 4 Meiyu season monitored by SGCAN

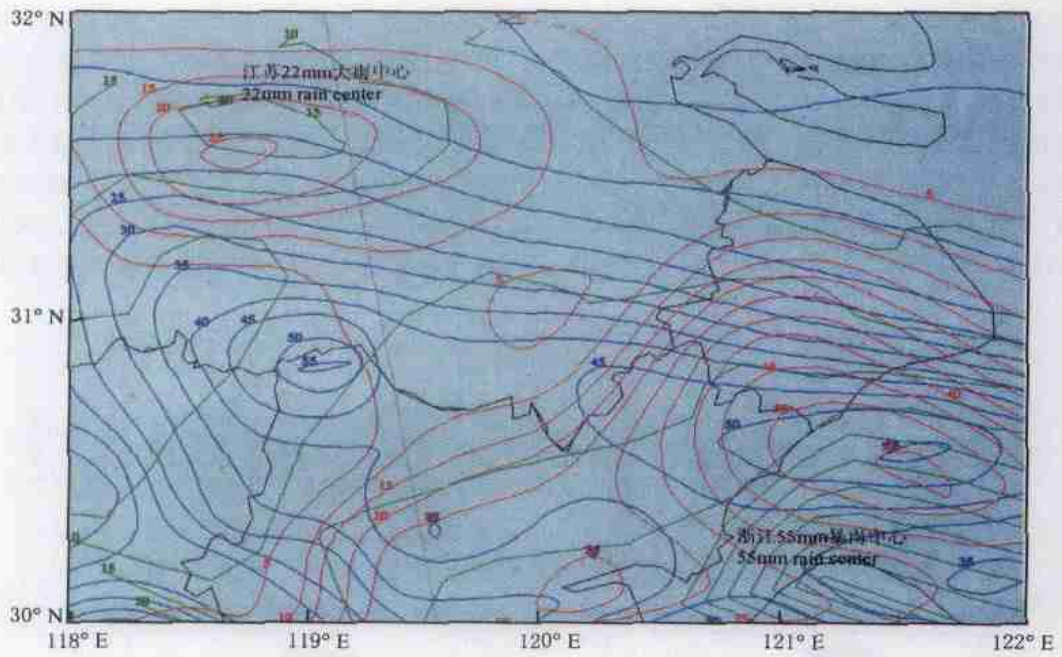


图7 GPS/PWV改善数值预报初始场的预报结果

图中蓝线为没加GPS资料的数值预报, 红线为加GPS资料作初始条件的数值预报, 绿线为实测雨量, 图中数字单位为mm.

Fig. 7 Numerical forecast with the improved background field by GPS/PWV

Blue line is the numerical forecast without GPS/PWV, red line with GPS/PWV, green line is rain observation.

明 GPS 探测的 PWV 描述雨带的移动具有很好的代表性. 所反映的天气现象与实际情况下长江三角洲地区梅雨季节的特征也是非常符合的.

4.3 GPS/PWV 对雷暴雨短期预报特性的分析

每年的初夏季节, 长江中下游是低纬度海洋上的暖湿气流与北方冷空气相遇并长期相持的地区, 使得这一地区, 强对流天气多, 短时雷暴雨频繁. 由于常规气象观测手段的时空分辨率比较低, 准确地预报这类天气仍然是很困难的. 而 GPS 可以连续 24 小时监测大气中的可降水量, 为了检验 GPS/PWV 对预报短期雷暴雨的价值, 分析了 2002 年 6~9 月份加密观测的每小时雨量, 进行了 GPS/PWV 对实际降雨的可预报性研究.

由图 2 中上海宝山站 (SHBS) PWV 和实际降雨的对应关系, 可以看出, 在第 175 天的 02:00 有一次 33mm 的降雨过程, 这前后的两次探空站常规观测 (Radiosonde) 是 (第 174.8333 天, 63.92mm), (第 175.3333 天, 63.99mm), 即在第 174 天 20:00 和第 175 天 08:00, 两次观测的可降水量很接近, 没有明显的增加, 所以利用常规的探空资料事前事后都比较难分析出这一次降雨过程. 但 GPS/PWV 在 175 天的 01:00 有一明显的高峰 (73.36mm), 对这次降雨正好有一个多小时的预报性, 探空站的加密观测 (175.08 天, 67.52mm) 也证明了这一点. 对于 172.5833 天 26mm、179.3333 天 12mm、185.5833 天 10mm、199.7917 天 24.3mm 和 186.3333 天 20mm 的降雨过程也分别对应着 PWV 的急升和陡降现象. 本文对长江三角洲地区 2002 年 6~9 月四月份每小时雨量大于 8mm 的 138 次降雨过程和对应的 GPS/PWV 峰值进行了比较统计, 结果如图 6 所示.

图 6 是每 30min 计算的 PWV 与每小时实际降

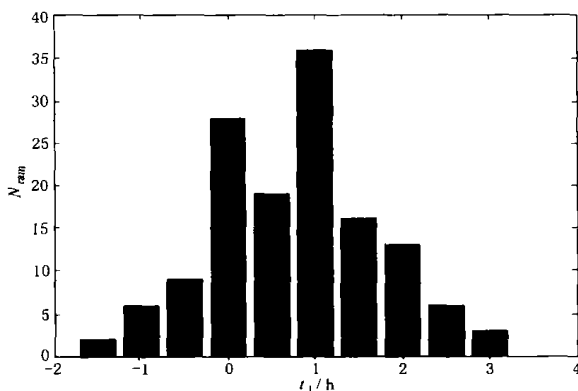


图 6 GPS/PWV 对降雨的预报特性统计 (N_{rain} 为降雨次数, t_1 为滞后时间)

Fig. 6 Statistics of short-term forecast ability of GPS/PWV

雨比较得出的结果, 我们可以看出实际降雨比 GPS/PWV 峰值的推后时间大部分都在 0~2h 内, 占将近 82% 的比例, 反映了 GPS/PWV 具有很好的短期预报特性, 而常规的探空资料一天只观测两次, 并且每次释放和回收探空气球的时间间隔需两个多小时. 所以利用地基 GPS 网来进行短期雷暴雨和台风等灾害性天气的实时预报具有非常大的潜力和可行性.

5 GPS/PWV 资料改进数值预报初始场的试验

如何把时空分辨率较高的 GPS/PWV 应用到数值天气预报中, 优化数值预报的初始场, 提高数值预报的准确性, 是 GPS 技术在气象学中进一步发挥作用的关键. 为了检验 GPS/PWV 对优化 MM5 数值预报模式初始场, 提高数值预报质量的作用, 选取了 2002 年 6 月 28 日 20 时至 29 日 02 时一次暴雨过程进行对比试验. 以 28 日 20:00 时为初始场, 分析了初始场加入和不加入 14 个站 GPS/PWV 资料两种情况下数值预报的结果.

5.1 改进方法

本试验采用 Kuo 等^[10]提出的廓线处理法进行对 MM5 模式初始湿度场的调整, 其步骤如下

(1) 利用模式初始场格点上垂直各层的水汽混合比 $q(k)$ 计算各格点的可降水量 Q_{PW}

$$Q_{PW} = \frac{P^*}{g} \sum_{k=1}^N q(k) h(k), \quad (1)$$

其中, k 为垂直层层次, $P^* = P_s - P_t$, P_s 为 MM5 模式某格点处的地面气压, P_t 为模式顶层气压, g 为重力加速度, N 为 MM5 模式中半 (数值天气预报中的垂直坐标) 面的层数, $h(k)$ 为第 k 层的厚度.

(2) 用 Cressman 分析方法把长江三角洲 14 个 GPS 站观测到的可降水量 Q_{obs} 插值到模式初始场各格点上, 得到 Q_{PW} .

$$Q_{PW} = \frac{\sum_{i=1}^m W_i Q_{obs}}{\sum_{i=1}^m W_i}, \quad (2)$$

式中, i 为到某一格点距离小于 R 的 m 个 GPS 测站的第 i 个 GPS 站. W_i 为 R 距离内第 i 个 GPS 站的距离权重系数, $W_i = \frac{R^2 - d_i^2}{R^2 + d_i^2}$, d_i 为该格点与第 i 个 GPS 站的距离.

(3) 调整各格点垂直层次上的水汽混合比

$$q(k) = q(k) Q_{PW}(k) / Q_{PW}(k), \quad (3)$$

式中 $q(k)$ 为调整后格点垂直层 k 层的水汽混合比. 若调整当一层的水汽混合比 $q(k)$ 大于由模式初始场计算的饱和水汽混合比 $q_s(k)$, 则 $q(k) = q_s(k)$.

水汽混合比调整以后, 进行 6 h 积分, 输出长江三角洲地区的 6 h 累积雨量分布, 分别与实际雨量分布比较.

5.2 实例

6月28日20时至29日02时, 实际降雨在浙江北部地区有一个6h雨量达55mm的暴雨中心和江苏丹阳地区有一个6h 22mm的大雨中心. 对浙江北部的暴雨中心, 起始场加入和不加入GPS/PWV资料的MM5预报结果大致相同, 预报55mm的暴雨中心位于杭州湾, 比实际暴雨中心位置偏北一点. 但对丹阳地区的大雨中心, 二者预报结果相差较大. 起始场未加入GPS/PWV资料的预报在江苏、浙江和安徽交界处的长兴地区有一个6h雨量达55mm的暴雨中心, 与实际降雨量和地点出入较大. 起始场加入GPS/PWV资料的预报在江苏、丹阳和会坛之间有一个25mm的大雨中心, 与实际降雨的地点和雨量均符合得很好, 如图7所示. 试验结果表明, 由于GPS/PWV资料的空间密度高, 可优化初始场分析, 从而提高雨量预报能力, 显示了GPS/PWV在短期雷暴雨的预报中所起的作用.

6 结 论

对于区域性地基GPS网, 在长基线辅助下, 利用IGS的超快速预报轨道可以实时地得到绝对的、分辨率为30min的可靠PWV序列, 监测精度与Radiosonde结果比较, 偏差为2mm左右, 对于海边测站需考虑海潮的影响. 上海GPS综合应用网在2002年夏季对长江中下游地区梅雨季节的监测数据表明, 地基GPS技术监测的PWV序列能反映长江三角洲地区详细的入梅过程和特点, 以及梅雨季节各个阶段雨带的来回摆动. 对每小时降雨和PWV峰值的对应关系统计分析说明, 在降水发生时, 大多伴有PWV的大幅度急升或陡降现象, PWV的急剧变化为雷暴雨的短期预报提供了一种新的有用信息. MM5

模式预报的每小时PWV与GPS观测值的比较, 说明GPS/PWV的序列资料可以作为检验MM5预报质量的有效工具. 对2002年长江三角洲地区雷暴雨数值预报的实例分析表明, 利用Cressman分析方法把GPS/PWV应用到中尺度数值预报模式初始场中, 可以提高初始湿度场的精度, 改善数值预报的初始场, 提高数值天气预报的准确性.

参考文献

- [1] Braun J, Rocken C, Ware R. Validation of single slant water vapor measurements with GPS. *Rad. Sci.*, 2001, **36**: 459 ~ 472
- [2] 王小亚, 朱文耀, 严豪健等. 地面GPS探测大气可降水量的初步结果. *大气科学*, 1999, **23**: 605 ~ 612
Wang X Y, Zhu W Y, Yan H J, et al. Preliminary results of precipitable water vapor monitored by ground-based GPS. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 1999, **23**: 605 ~ 612
- [3] Iwabuchi T, Naito I, Manjoji N. A comparison of global positioning system retrieved precipitable water vapor with the numerical weather prediction analysis data over the Japanese islands. *J. Geophys. Res.*, 2000, **105**: 4573 ~ 4585
- [4] 林学椿, 张素琴. 1998年中国特大洪涝时期的环流特征. *地球物理学报*, 2000, **43**(5): 607 ~ 615
Lin X C, Zhang S Q. Characteristics of the circulation during the catastrophic flood period over China in 1998. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), **43**(5): 607 ~ 615
- [5] Christian R, Ware R, Teresa Van Hove, et al. Sensing atmospheric water vapor with the global positioning system. *Geophys. Res. Lett.*, 1993, **20**: 2631 ~ 2634
- [6] Duan Jingping, Michael Bevis, Fang Peng et al. GPS meteorology: Direct estimation of the absolute value of precipitable water. *Journal of Applied Meteorology*, 1996, **35**: 830 ~ 838
- [7] 段五杏, 吴显兵. Sherneck海潮系数对中国GPS网的适用性分析. *测绘通报*, 2001, **10**: 18 ~ 19
Duan W X, Wu X B. 2001: The applicability of Sherneck tide coefficient for Chinese GPS network. *Bulletin of Surveying and Mapping* (in Chinese), 2001, **10**: 18 ~ 19
- [8] Gutman S I, Benjamin S G. The role of ground-based GPS meteorological observations in numerical weather prediction. *GPS Solutions*, 2001, **4**(4): 16 ~ 24
- [9] Enardson T, Range G E, Johansson J M. Three months of continuous monitoring of atmospheric water vapor with a network of Global Positioning System receiver. *Journal of Geophysical Research*, 1998, **103**(D2): 1807 ~ 1820
- [10] Kuo Y H, Guo Y R, Westerwater E R. Assimilation of precipitable water vapor into mesoscale numerical model. *Mon. Wea. Rev.*, 1993, **121**: 1215 ~ 1238