

区域 GPS 气象网站点合理布置的几点依据

丁金才¹ 叶其欣¹ 马晓星¹ 朱文耀² 陆艳艳³ 仇 欣³ 江 飞³

(1. 上海中心气象台, 上海 200030; 2. 中国科学院上海天文台;
3. 南京大学大气科学系)

提 要: 区域 GPS 气象网反演的可降水量资料 (GPS/PWV) 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已显示出广阔的应用前景, 我国许多省市相继计划建设区域的 GPS 气象网。在区域 GPS 气象网中如何科学合理地布设 GPS 站就成了大家关注的问题。结合长江三角洲地区 GPS 气象网的情况, 从长江三角洲地区的水汽通道, PWV 分布的气候统计、GPS 反演 PWV 资料的有效半径和在数值天气预报中资料同化的最大影响半径等 4 个方面, 讨论了区域 GPS 网站点的分布和间距的几点依据: 重点沿区域的水汽通道和强对流天气主要路径上布站, 经向 (南北向) 的站点密度应大于纬向密度, 站点的最大间距小于 60 km 才能使反演的 PWV 的有效代表性和对数值预报的影响覆盖整个区域。

关键词: 区域 GPS 气象网 站点分布 站点间距

Some Bases of Reasonable Distribution of GPS Stations within an Area GPS/MET Network

Ding Jincal¹ Ye Qixin¹ Ma Xiaoxing¹ Zhu Wen Yao²
Lu Yanyan³ Qiu Xin³ Jiang Fei³

(1. Shanghai Meteorological Center, Shanghai 200030;
2. Shanghai Astronomical Observatory, CAS; 3. Atmospheric Department, Nanjing University)

Abstract: The precipitable water vapor estimated by an area GPS/MET network (GPS/PWV) has brought out the wide application prospects for improvement of detecting and fore-

资助项目: 得到中国科学院知识创新项目 (kjc2-sw-t1-3) 和上海市科委攻关课题 (032512029) 的资助

收稿日期: 2005 年 8 月 16 日; 修定稿日期: 2005 年 12 月 5 日

casting severe weather and for numerical weather prediction. Some provinces and regions in China are going to build area GPS/MET networks. How to set up reasonably GPS stations within an area becomes a regardful issue. With the instance of the GPS/MET network in Yangtze River Delta area built in 2002, it is analyzed from four aspects, i. e., the moisture transmission passages, the PWV climatic statistic features, the effective radius of retrieving GPS/PWV and the influencing radius of GPS/PWV data assimilation at a station in NMP model of MM5. Finally, some bases of reasonable distribution of GPS stations within an area GPS/MET network are discussed; more GPS stations should be located along the way of moisture transmission and the severe storm moving, the meridional density of GPS stations should be more than the zonal density; the maximum distance between the two adjacent stations is suggested to be less than 60 km, so that the effective representatives of the PWV data and its influence on the NWP may cover the whole area.

Key Words: area GPS/MET network station distribution station space

引言

利用 GPS 卫星探测大气参数是 20 世纪 80 年代末 90 年代初发展起来的一种全新的空间探测大气的方法。通过地基 GPS 接收机测得的 GPS 卫星信号延迟量可反演出大气可降水量 (GPS/PWV)。大气降水量的定义是单位面积上从地面到大气层顶的垂直空气柱内的水汽总量, 它的度量单位通常处理成雨量单位 mm。由于它具有全天候、高精度、高时空分辨率和成本低等优点, 可有效地弥补目前常规观测手段对大气中水汽测量的不足, 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有广阔的应用前景, 因而引起了气象工作者的广泛重视。现在已发展成为气象学的一个新分支“地基 GPS 气象学”^[1~3]。

从上世纪 90 年代后期起, 世界上许多国家和地区相继建立了国家级或地区级的 GPS 气象网, 并先后实现了实时化和业务化。我国从 2002 年开始先后建立了区域 GPS 气象网。上海市政府于 2002 年 6 月建成了由 14 个 GPS 站组成的长江三角洲地区

GPS 气象网, 并投入实时运行, 在业务天气预报和数值天气预报中发挥了一定的作用^[4]。中国气象局建立了京津冀地区 GPS 气象网, 北京市建立了北京地区的 GPS 气象网, 带动了我国的 GPS 气象学的研究和业务的开展。目前我国许多省市相继计划建设区域的 GPS 气象网。如何科学合理的布设 GPS 站点就成了大家关注的问题。本文根据长江三角洲地区 GPS 气象网近三年积累的可降水量资料的分析, 从长江三角洲地区的水汽通道和强对流天气的主要路径、水汽分布的气候统计、反演的 PWV 资料的有效代表半径和在数值天气预报中资料同化的最大影响半径等 4 个方面, 讨论了区域 GPS 网的站点的分布和间距的一些依据。

1 重点沿区域水汽通道和强对流天气的主要路径布点

区域 GPS 气象网的主要功能是获取高时空密度的大气的水汽资料, 用于气候、降水和强对流天气的研究、监测和预报。因此, 重点沿地区的水汽通道上和灾害性天气的主要路径上布设 GPS 站点。

长江三角洲地区的水汽通道主要有两条,如图 1 所示。冬春季节,水汽主要沿西南气流向东北方向输送到长江三角洲地区,造成降水和暴雨过程。在夏秋季节,水汽主要来自位于东南方的洋面,带来台风和其他东风系统的降水。春夏季节的强对流天气系统常常经两条路径影响上海地区。一条是西路:自安徽马鞍山经过常州、太湖影响上海;或在太湖附近生成后东移进入上海。另一条是北路:在江苏北部生成后快速南下,越过长江后影响上海北部地区。因此在设计长江三角洲地区 GPS 气象网时,在西南气流的水汽通道上布设了黄山市和杭州 GPS 站,舟山 GPS 站位于东南气流的水汽通道上,在台风向西北方向移近华东沿海时能提前 10 个小时以上反映出水汽的变化^[5]。影响上海的强对流天气 60% 来自西路,因此沿西路路径自西向东布设了马鞍山、宣城、常州和东山 4 个站;高邮和东台两个 GPS 站位于强对流天气的北路路径上。这些站的平均间距为 105km^[5]。上海地区之所以有 5 个 GPS 站,除了气象用途外,还要用于精密测量和定位等用途。

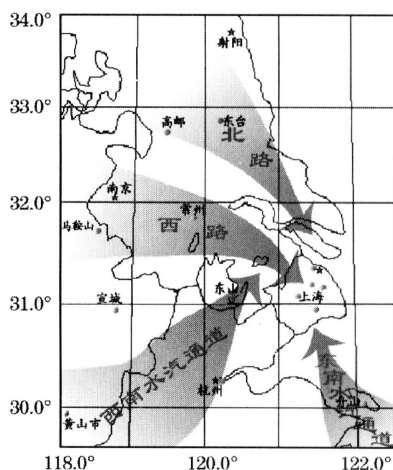


图 1 长江三角洲地区 GPS 气象网 14 个 GPS 站点分布以及主要水汽通道和强对流天气路径

根据 2002 年 6 月~2003 年 12 月该 GPS 网观测的 PWV 资料分析表明,长江三角洲地区在冬半年和夏半年确实存在两条显著不同的水汽通道。如图 2 所示,在夏半年(6~11 月),水汽来源主要是东南方向的海洋,从舟山向西北方向输送,经过江苏省的东山、常州到高邮,形成一条东南—西北走向直至 33°N 的高值带。而冬半年(12 月~

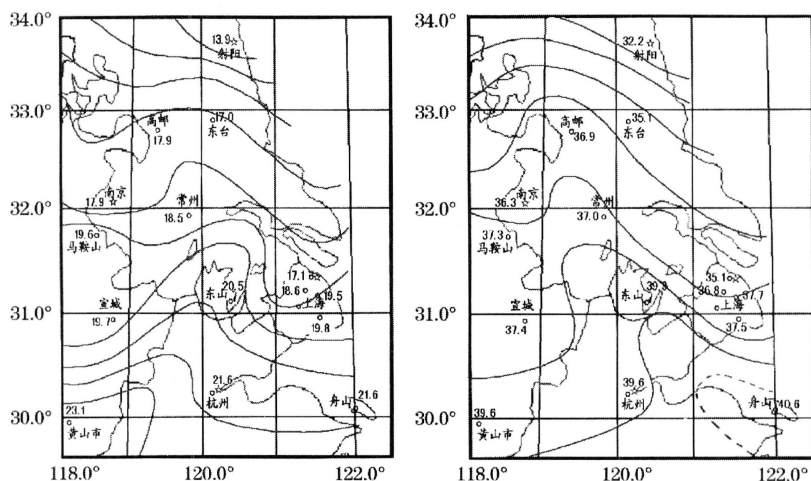


图 2 长江三角洲地区冬半年 (a) 和夏半年 (b) GPS/PWV 分布

图中 PWV 数值为半年平均值,单位: mm

次年5月)水汽主要来源于西南方向的内陆,由黄山向北东北方向输送,经过东山到达常州。水汽输送至32°N。

近两年的应用结果表明,该GPS网提供的半小时间隔的PWV资料能有效地实时跟踪水汽的变化,为实时的降水预报增加了一个重要的依据。

2 经向站点密度应大于纬向站点密度

利用长江三角洲GPS气象网的19个月的可降水量资料进行的气候统计分析,发现长江三角洲地区的水汽分布差异主要与纬度有关,而与海陆的地形差异关系不大^[6]。长江三角洲东临黄海和东海,西连大陆,通常认为这种地形差异决定了水汽的气候平均值应该自西向东逐渐增加。但是,表1显示的统计结果表明:各季节的PWV平均值在南北方向上的差异比东西方向上的差异大得多。PWV的季节平均值的南北差异在7~8月较小,为1.4mm,其他季节都在4mm以上。而PWV的季节平均值的東西差异都小于1mm。即使在秋季最大,也只有1.4mm。PWV的年平均值的南北差异是东西差异的7倍。这说明了地理纬度对PWV的分布起了主要作用。因此,长江三角洲GPS气象网的经向(南北向)的站点密度应明显大于纬向(东西向)站点密度。但是在长江三角洲GPS气象网建设时还没有认识到水汽分布的这一气候特点,并没有按照这一依据布点。建议其他区域GPS气象网建设时,可考虑这一依据,以节省费用。

3 GPS站反演PWV的代表性有效半径

众所周知,日常探空观测时,由于携带仪器的气球在上升过程中有水平漂移,它所获得的各高度层的气象记录并不是严格代表测站天顶方向的大气情况,而是代表气球水平漂移范围内的平均状况。根据上海宝山站

2004年3月到2005年1月的探空报中的气球水平漂移记录的统计结果,气球的水平漂移在5km高度处是20km以内,在8km高度处是30km之内(图略)。

表1 长江三角洲PWV的季节和年平均值的纬向和经向分布

(根据2002年6月~2003年12月统计结果,单位mm)

月	33°N	32°N	31°N	30°N	119°E	120°E	121.5°E
7~8	53.0	54.2	54.1	54.3	54.0	54.4	53.7
9~10	29.2	29.4	29.7	33.9	30.0	30.2	31.4
11~3	12.7	14.4	14.9	16.7	14.8	14.7	15.3
4~6	31.8	33.8	34.9	38.3	35.8	34.5	34.9
平均	28.7	30.0	29.8	32.9	30.3	30.1	30.9
南北差			4.2mm		东西差		0.6mm

同样,利用GPS反演的可降水量是根据GPS站在某一时段内接收到仰角15°以上的各GPS卫星斜路径上的信号湿延迟量在天顶方向的投影计算的,它实际代表的是以GPS接收机为顶点,顶角为150°的倒圆锥体内大气中水汽量的平均状况^[7]。从图3可见,GPS站反演的PWV在距站点13km处仅代表了3km以上大气中的水汽。依次类推,在距站点20km和30km处代表的是分别5.5km和8km以上大气中的水汽。这与探空气球漂移的水平距离与对应的高度比基本相同。

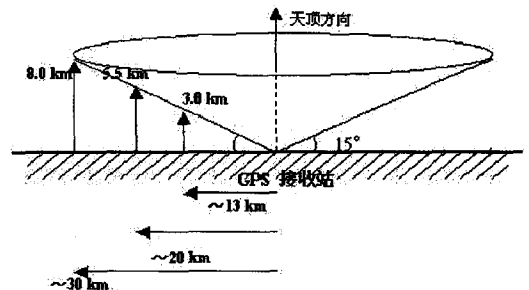


图3 利用GPS延迟信号反演可降水量时GPS站接收的GPS卫星方位

大气中的水汽随高度是按指数递减的。根据 2002 年 6~12 月上海宝山探空站的资料统计, 3 km 以上的大气中水汽占整个大气水汽总量的 24%~10%; 5 km 以上的大气中水汽占 9%~3%; 8 km 以上的大气中水汽占 2%~1%, 夏季占的比例比冬季大一些。根据图 3 所示的距离和高度的关系, 可画出 GPS 反演的水汽的代表性与离站点的距离呈指数减小的曲线(图略)。GPS 观测的截止仰角定为 15° 时, 在距测站 30 km 处, GPS 反演的水汽的代表性接近零。也就是说, GPS 反演的 PWV 的代表性的最大有效半径距离为 30 km。有的 GPS 观测的截止仰角定为 7° , 以增加 GPS 测量 PWV 的代表性的有效距离。但由于受多路径和其他条件限制, 观测仰角太低又会增加延迟量的误差, 限制了反演精度。根据这一分析结果, GPS 气象网的站点间距应小于 60 km, 它所反演的 PWV 才能覆盖整个区域的水汽状况。

4 GPS/PWV 资料在数值预报资料同化中对预报的影响半径

区域 GPS 气象网反演 GPS/PWV 资料的重要用途之一是在数值预报中资料同化。GPS/PWV 资料同化后对数值预报结果的影响半径可作为区域 GPS 气象网站点布设的依据之一。

本文利用 2002 年 6 月 18 日~7 月 30 日中的 38 天的 GPS/PWV 资料对 MM5 业务预报模式进行了三维变分同化的连续试验, 通过对第一个 6 小时累积雨量的预报结果的影响, 分析了一个 GPS 站 PWV 资料的影响半径。

选用 MM5 业务模式作为试验模式, 双重嵌套, 垂直 27 层, 水平网格距为 15 km, 格点数为 52×62 , 覆盖整个长江三角洲地区。模式湿物理过程采用包含冰相过程的混合相参数化方案, 积云参数化方案选用 BM

方案。先以每日 20 时的常规气象资料为起始场, 预报到次日 20 时, 每积分 6 小时输出该 6 小时的累计降水场。规定 20 时到次日 02 时为次日的第一个 6 小时, 依次类推。然后用三维变分同化技术对地面、高空观测资料和 GPS/PWV 资料进行同化分析。GPS 可降水量的测量误差取为 2 mm, 地面、高空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 方法计算出背景场的误差协方差矩阵。利用 MM5 模式提供的 REGRID 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 MM5-3DVAR 系统的输入, 与上述常规资料为起始场一样作预报^[8]。实际降水记录来自长江三角洲地区所有的 91 个气象台站的自动雨量站。预报场的雨量用 Cressman 方法内插到这 91 个雨量点上, 以第一个 6 小时雨量有或无的定性预报正确率来判断 GPS/PWV 资料对预报结果的影响。

首先定义某一个雨量点上 38 天的预报正确率在同化 GPS/PWV 资料后比未同化 GPS/PWV 资料提高 5% 的站点为明显改进的站点, 否则为无明显改进的站点。选取 12 个 GPS 站点和探空站为基本点, 为保持站点间距的均匀, 上海只取一个 GPS 站。整个区域的站点平均间距为 105 km。以 12 个基本点为圆心, 一定半径 r 作圆。这 12 个圆中包含有明显改进的站点数用 $f(r)$ 来表示, 而无明显改进的站点数用 $g(r)$ 来表示, $f(r)$ 和 $g(r)$ 的比值 $ER(r)$, 定义为有效比值。作出 $ER(r)$ 随半径 r 变化的点聚图, r 以 1 km 为增量, 变化范围为 15~85 km。如图 4 所示, 实线是 $ER(r)$ 与半径 r 关系的多项式拟合曲线。在距 GPS 测站 20 km 内, $ER(r)$ 大于 1, 说明 GPS/PWV 资料同化后对预报结果有明显提高的站点占多数, GPS/PWV 在这一范围内影响明显。随着与站点的距离增大, $ER(r)$ 呈直线下降, 表示 PWV 资料对降水预报结果的影响程度随距

离迅速减小。距离超过 40km, $ER(r)$ 趋于稳定, 在 0.65 上下波动, 与 r 无关, 表明该站的 PWV 资料对 40km 以外的区域的预报结果的影响趋于消失。可以认为一个 GPS 站的 PWV 资料对业务 MM5 模式的降水预报的最大影响半径为 40km。因此, 从数值预报的资料同化的需要出发, GPS 站点的间距应该在 80km 之内, 它所反演的 PWV 资料对 MM5 的降水预报影响才能覆盖整个区域。

虽然, 不同模式和不同预报对象的试验结果可能不同, 本文选择了包括长江三角洲地区梅雨和盛夏季节的连续 38 天进行了这次试验, 其结果应该具有一定的适用性。综合上一节分析的 GPS 反演的 PWV 的有效代表半径为 30km 的结论, 区域 GPS 气象网站点的最大间距应在 60km 左右较为合理。

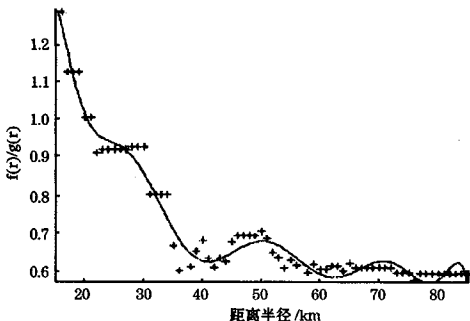


图4 PWV 资料在数值预报模式中同化后对降水预报改进的有效比值 $ER(r)$ 随离站点距离半径 r 变化的点聚图

+ 资料点 实线是多项式拟合曲线

5 结论

根据上述四个方面的分析, 对区域 GPS 气象网的站点布设提出了如下 3 条依据。

(1) 区域 GPS 气象网的 GPS 站应该重点沿区域内的水汽通道和强对流天气过程的主要路径上布设, 有利于在实时预报业务中通过监测水汽的变化来监视和预报降水过程和强对流天气的发生和移动。

(2) 地理纬度对 PWV 的分布起了主要作用。因此, 区域 GPS 气象网的 GPS 站点的经向密度应该明显大于纬向密度。

(3) GPS 反演的水汽的代表性与离站点的距离呈指数减小。GPS 观测的截止仰角定为 15° 时, GPS 气象网的站点间距应小于 60km, 它所反演的 PWV 才能代表整个区域的水汽状况, 对业务 MM5 模式的降水预报的影响能覆盖整个区域。

应该指出的是, 上述结论是根据长江三角洲地区 GPS 气象网的近三年积累的数据分析得出的。只是供其他地区建设 GPS 气象网的参考依据。对于某些特殊用途, 如层析等, 对 GPS 站的密度要求更高, 不在本文讨论范围。

感谢: 奚红为修改文中附图付出了辛勤的劳动, 深表感谢。

参考文献

- 1 Bevis M, Businger S, Chiswell S, et al. GPS Meteorology: mapping zenith wet delays onto precipitable water. *Journal of Applied Meteorology*, 1994, 33: 379—386.
- 2 C. Rocleen, T. V. Hove eta. GPS/STORM-GPS sensing of atmospheric water vapor for meteorology. *Journal of Geophysical Research*, 1995, 12: 468—477.
- 3 李延兴, 徐宝祥. 用地基 GPS 观测站遥测大气含水量和可降水量的理论基础与实验结果. *中国科学 (A 辑)*, 2000, 30 (增刊): 107~110.
- 4 丁金才, 叶其欣. 长江三角洲地区近实时 GPS 气象网. *气象*, 2003, 29 (6): 2629.
- 5 丁金才, 黄炎, 叶其欣等. 2002 年台风 Ramasan 影响华东沿海期间可降水量的 GPS 观测和分析. *大气科学*, 2004, 28 (4): 613~624.
- 6 姚建群. 用 GPS 可降水量资料对一次大—暴雨过程的分析. *气象*, 2005, 31 (4): 48~52.
- 7 岩崎博之, 木村富士男, 中尾茂等. The influence of the moisture gradient on the accuracy of precipitable water derived from GPS data. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 2000, 78 (3): 223—231.
- 8 袁招红, 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. *气象学报*, 2004, 62 (2): 200~212.