

上海地区地基 GPS 水汽三维层析技术和初步应用*

刘 敏^{1†} 郭 鹏² 叶其欣¹ 张 洁¹ 朱雪松¹

(1 上海市卫星遥感与测量应用中心 上海 201100)

(2 中国科学院上海天文台 上海 200030)

摘要 地基 GPS (Global Positioning System) 探测大气水汽主要包括 3 个方面的内容: 一是观测天顶方向的大气水汽总量 (Precipitable Water vapor, PW); 二是遥测倾斜的信号路径上的水汽总量 (Slant-path Water vapor, SW); 三是应用组网的 GPS 站倾斜路径观测反演局地上空的水汽三维信息, 即水汽层析 (water vapor tomography) 技术. 简单介绍了上海地区稠密的地基 GPS 网, 并且在该网的基础上通过 GAMIT 软件计算出的整层水汽 PW 和各个方向上的梯度信息及观测残差, 来获得 GPS 测定的 SW, 运用层析的技术可获得上海地区水汽的三维分布信息. 以 2008 年 8 月 25 日上海罕见的大暴雨为例, 分析了水汽三维结果在强对流天气中的应用.

关键词 天体测量, 大气效应, 方法: 数值

中图分类号: P 128; **文献标识码:** A

1 引言

大气中水汽的三维空间分布信息对于中小尺度数值预报模式的研究非常重要, 从气象角度来讲, 目前水汽的三维空间分布主要依靠国家业务探空网来提取, 由于探空站之间的间距均在 200~300 km 以上, 很难捕捉空间尺度小于 100 km 的中尺度暴雨系统, 而气象卫星资料直接反演的水汽精度又较低, 误差约为 20%. 因此, 利用稠密的地基 GPS 观测网来获得高精度的三维水汽技术被提出并逐渐发展.

GPS 气象学是近二十年来蓬勃发展起来的一门交叉学科, 根据接收机的位置和反演方法的不同, 可以分为空基 GPS 气象学和地基 GPS 气象学. 美国的 UCAR (University Corporation for Atmosphere Research) 研究组 1995 年就利用搭载在 LEO (Low Earth Orbit) 卫星上的 GPS 接收机成功地反演出气象参数和电离层电子密度的剖面结构. 郭鹏等^[1-4] 讨论了非圆轨道 LEO/GPS 掩星反演地球大气参数的算法和中性大气的标准反演技术, 洪振杰等^[5] 开始了 GPS 掩星的变分同化技术的研究.

2009-03-11 收到原稿, 2010-01-11 收到修改稿

* 国家科技部 863 计划 (2006aa12a107) 和灾害天气国家重点实验室开放课题 (2009LASW-B10) 资助项目

†lisa8204@hotmail.com

在地基 GPS 方面, Bevis 等^[6] 首先提出了采用地基 GPS 技术探测大气水汽含量的原理, 开始了地基 GPS 气象学的研究. 目前地基 GPS 探测 PW 技术方法都很成熟, 精度可达毫米量级, 但 PW 仅是测站上空大气水汽的一维空间分布. 为了获得更多的气水汽信息, Braun 等^[7] 基于双差处理法利用湿梯度、残差联合模拟接收机上空不同方位上大气水汽各向异性成分, 可近实时遥感探测 SW. Braun 等^[8] 还把 GPS 与水汽辐射计 (Water Vapor Radiometer, WVR) 观测结果对比分析发现, GPS 观测 SW 的精度可以达到毫米量级. 宋淑丽等^[9] 利用无电离层影响的 GPS 非差观测组合直接计算 SW 也取得了进展, 毕研盟等^[10] 也用 WVR 与 GPS 分别在西安和南京一起进行了联合观测, 不同观测地点和时间的对比结果表明, 二者的均方根误差小于 4 mm.

初步研究表明 GPS 测定的 SW 包含水汽剖面信息, 利用 SW, 通过层析可获得水汽的三维分布信息. 利用 GPS 通过层析分析获取空间尺度小于 100 km、具有较高精度的三维水汽资料, 这为提高中尺度暴雨数值预报的精度提供了良好的初值条件, 从而提高中尺度暴雨数值预报的精度和预报准确率.

本文利用上海本地高密度的地基 GPS 网, 采用基于双差处理的方法获得 SW, 使用合适的层析方法, 获得上海地区的三维水汽密度, 并且实现了近实时业务运行. 最后, 以 2008 年 8 月 25 日的上海地区大暴雨为例, 与其它的探测手段相比, 讨论了水汽的三维分布在强对流天气中的应用.

2 上海地区地基 GPS 网

与上海测绘院、上海地质调查院单位协作, 将上海市测绘院建有的 9 个站、上海地质调查研究院建有的 4 个站整合到长江三角洲 GPS 网中. 这样, 包括原来长三角 GPS 网在上海的 5 个站、上海市气象局自建的 5 个站, 上海地区可有 23 个 GPS 基准站资料实时共享, 使陆上基准站的密度达到小于 15 km, 部分地区小于 10 km. 上海地区的 GPS 站点分布如图 1 所示, 其中不同的站点符号代表来自不同的部门 (其中☆为气象局, △为测绘院, ○为地调院).

3 斜路径求解

3.1 映射函数和梯度函数

估计 PW 时采用了映射函数, 即将某一卫星方向的延迟通过映射函数映射到天顶方向, 这一函数对延迟的估算有明显的影响. 已发展了许多不同的函数, 包括 Saastamoinen 映射函数、Marini 映射函数、Davis 映射函数和 Niell 映射函数等. 目前主要的处理 GPS 数据的软件是 GAMIT、BERNESE 和 GIPSY, 文中的结果由 GAMIT 软件处理. 考虑到 GAMIT 软件求解天顶方向的总延迟时, 使用的是 Niell 映射函数将各个斜路径方向的延迟投影到天顶方向, 所以将 Niell 映射函数和 GAMIT 的梯度函数介绍一下.

3.1.1 Niell 映射函数

考虑到大气参数与测站的地理坐标有一定的联系, 同时又尽可能地消除理论大气模

型与测站上空真实大气之间的误差, Herring^[11] 利用北美 10 个探空气球站的数据, 分别对大气中的干分量和湿分量建立了一种新的、在天顶方向归一化的映射函数 m_h 和 m_w , 为

$$m_h(e) = \frac{1 + a_h/[1 + b_h/(1 + c_h)]}{\sin e + \frac{a_h}{\sin e + c_h}}, \quad (1)$$

$$m_w(e) = \frac{1 + a_w/[1 + b_w/(1 + c_w)]}{\sin e + \frac{a_w}{\sin e + c_w}}, \quad (2)$$

其中 e 为仰角, $m_h(e)$ 、 $m_w(e)$ 分别为 Niell 干、湿映射函数, a_h 、 b_h 、 c_h 为干映射函数系数, a_w 、 b_w 、 c_w 为湿映射函数系数.

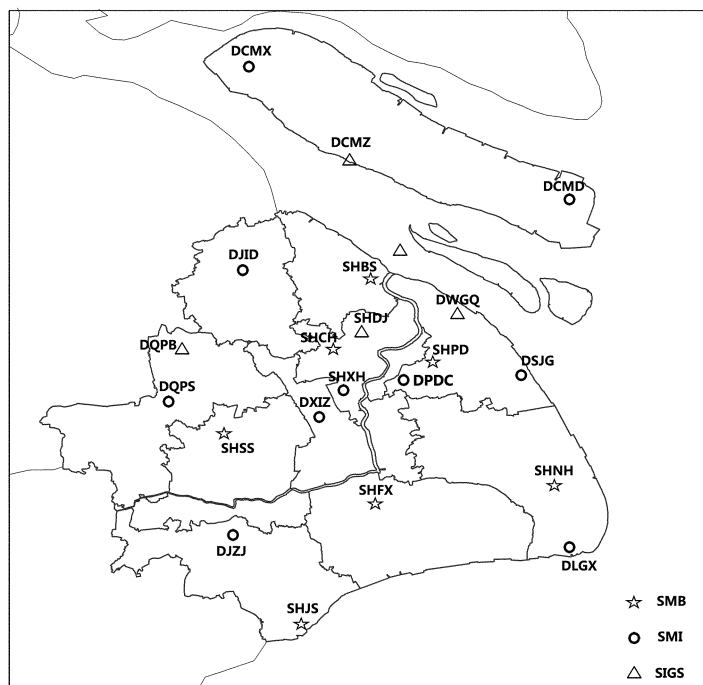


图 1 上海地区地基 GPS 站点分布图 (其中 ☆ 隶属气象局, △ 隶属测绘院, ○ 隶属地调院)

Fig.1 The distribution of the GPS stations in Shanghai (☆, △ and ○ represent stations which belong to Shanghai Meteorological Bureau, Shanghai Surveying and Mapping Institute and Shanghai Institute of Geological Survey, respectively)

Niell^[12] 使用连分式数学形式, 应用了 26 个全球分布的探空气球资料, 建立了在无线电波段上的一个“全球大气延迟映射函数”, 称为 NMF (Niell Mapping Function) 模型. Niell^[12] 认为地表温度要比 2 000 m 以上的大气变化剧烈得多, 取决于地表参数的模型限制了模型精度. 考虑随时间周期性变化的大气层分布, 采用美国标准大气模型, Niell^[12]

发展了新的映射函数, 函数中的系数与气象观测无关, 而与地理位置有关, 并给出了北纬 15° 、 30° 、 45° 、 60° 、 75° 的系数, 高度角为 $30^\circ \sim 120^\circ$ 时, 误差小于 4 mm.

相比于其它模型, NMF 模型中的映射函数的系数 a 、 b 、 c 表示为与测站地面气象记录完全不相关的测站地理纬度 φ 、地理高度和年首日数 t (Day of Year) 的函数

$$a(\varphi_i, d) = a_{\text{avg}}(\varphi_i) - a_{\text{amp}}(\varphi_i) \cos(2\pi \frac{t - T_0}{365.25}), \quad (3)$$

其中 T_0 选定为 28, 下标 i 是测站的标号. 参数 b 、 c 具有与 (3) 式类似的形式. 对 NMF 模型的干、湿两个分量的所有系数均在 Niell^[12] 中按测站纬度用列表形式给出. 线性内插法可以用来求任意测站、任意历元的系数. 在 NMF 模型中, 没有考虑大气中水汽含量的变化对干映射函数的影响.

3.1.2 GAMIT 软件梯度模型

GAMIT 软件中梯度延迟模型如下:

$$D_G(e, \phi) = m_\Delta(e)[G_N \cos(\phi) + G_E \sin(\phi)], \quad (4)$$

其中 ϕ 为方位角, G_N 、 G_E 分别是南北、东西方向梯度, $m_\Delta(e)$ 是梯度映射函数, 形式如下:

$$m_\Delta(e) = 1/(\sin(e) \tan(e) + C), \quad C = 0.003. \quad (5)$$

3.2 斜路径方向水汽

求解 SW 有两种方法: 一种是直接从观测方程解出来, 但是这要求获得卫星和台站钟差等信息, 不能够实时获得结果; 另一种方法是通过已经能够实时计算的 PW 来获得, 因此能够实现实时业务运行, 文中主要介绍后一种方法.

对流层总延迟可以表达为

$$D_T = m_h(e)D_{\text{hz}} + m_w(e)D_{\text{WZ}} + m_\Delta(e)[G_N \cos(\phi) + G_E \sin(\phi)] + R_e, \quad (6)$$

其中 D_{hz} 、 D_{WZ} 分别为天顶干、湿延迟, R_e 为解的残差项 (观测值减模拟值), 主要由大气不均匀性及可变性引起, 单用梯度项模拟大气不能体现不均匀性, 加上残差项能够弥补这个不足, 尤其是在低仰角观测时.

我们使用 GAMIT 软件进行数据处理, 首先计算出天顶方向总的对流层延迟和总的延迟梯度项. 对于干延迟, 我们引入气象参数来计算, 从总延迟中减掉干延迟即为天顶湿延迟. 但是对于梯度项, 模型给出的结果并不区分干、湿延迟梯度项, 我们利用干延迟梯度项一般较稳定的特点, 即假定干延迟梯度在某一时间段内 (如 12 h) 为一常数, 通过对梯度解作时间平均降低或消除干延迟梯度的影响, 这样就可以得到湿延迟梯度项^[13].

去除所有干延迟参数, 加上后处理的残差项, 即得到了信号路径上的湿延迟

$$S_i^k = m(e_i^k)Z_i + \Pi \times [m_\Delta(e)(G_N^W \cos(\phi) + G_E^W \sin(\phi)) + R_e], \quad (7)$$

其中 i 为台站号, k 为卫星号, Z_i 代表台站 i 上空水汽总量 PW, G_N^W 、 G_E^W 分别代表南北、东西方向湿延迟梯度项, Π 是比例常数, 可以取为 0.15.

4 网格划分与层析

4.1 层析网格的划分

水平网格的划分主要满足以下两个条件:

(1) 一般不能超过 60 km

为了消除多路径效应等的影响, 我们使用的 e 为 10° , 当然还可以更高, 但是观测到的信号会减少. 考虑到上海地区所处的纬度, 一般认为对流层层顶约 10 km, 所以我们选择的层析的高度为 10 km, 那么可以计算出 GPS 站所处的网格最大边长 $10/\tan(e)$ km, 约 57 km. 如果边长超过这个限制, 同一台站所有接收到的信号射线在地面的投影都处在同一个网格内.

(2) 尽量让每个网格内都有台站

要解决这个问题, 要求尽量密的台站分布, 上海地区的台站分布是中国地区密度最大的局域网之一, 达到 $10\text{ km}\times 10\text{ km}$, 基本能符合要求.

在垂直方向上, 层析所能分辨的每层厚度问题, Flores 等^[14]的研究表明, GPS 层析可分辨的最小垂直厚度约为 300 m. 如果厚度小于此值, 则噪音会影响层析结果, 但层析适宜的垂直分辨率是多少, 他们并没有给出结果.

对于垂直方向, 先选择 1 km 的分辨率, 而水平方向, 考虑引入数值预报作背景场, 以及后期结果应用于数值预报作先验值, 我们选择和 WRF (Weather Research Forecast) 模式相匹配的水平格距, 为 $18\text{ km}\times 8\text{ km}$, 以上海的中心经纬度 $[N\ 31^\circ, E\ 121.5^\circ]$ 为中心, 将上海地区划为 16 个网格.

4.2 层析方法

Flores 等^[14]提出一种层析方法, 把分析区域分成若干三维单元网格, 把每一网格内的湿折射率看成未知数, 在一定观测时间内可以有足够的观测值使方程的个数大于未知数的个数, 利用最小二乘法求解. 虽然方程的个数大于未知数的个数, 因为在某些单元网格中没有信号通过, 未知数还是无法确定, 所以又采用了约束条件方程, 实际处理时, 采用了水平约束、垂直约束和边界条件.

Braun 等^[8]在 Flores 等^[14]的基础上对该方法进行了一些改进, 包括 GPS 信号通过的单元网格的计算, 本文亦采用该方法, 具体如下:

(1) 观测方程

我们把上海地区的 GPS 网上空的对流层大气在水平和垂直方向上划分为许多网格, 假设一定时间内每个网格内水汽密度是一常数且分布均匀, 则每一条观测路径 P 上的水汽总量为这条射线所穿越的网格的水汽量之和, 为

$$S^P = \sum_{ijk} (F_{ijk}^P X_{ijk}), \quad (8)$$

其中 X_{ijk} 为第 i 行 j 列 k 层网格的水汽密度, F_{ijk}^P 为射线 P 穿过该网格的长度. 在一

定时间的观测内, 会获得大量上述的观测方程.

(2) 水平约束

虽然上述的方程数目远大于未知量数目, 但是从台站分布可以看出, 并不能保证地面每个网格点都有测站, 致使某些网格没有射线穿过, 所以需要给出一定的水平约束. 因为水平方向上的水汽分布是连续的、相互关联的, 我们假设距离越相近, 则相关性越强, 采用了高斯加权函数进行约束, 用矩阵方程可表达为

$$QX = 0, \quad (9)$$

其中, 系数矩阵 Q 的元素采用下式计算

$$Q_i = \sum_{j=1}^U e^{-(l_j-l_i)/L}, i \neq j, i = 1, 2, \dots, V, \quad (10)$$

其中 $l_j - l_i$ 是两个单元格中心点之间的距离, L 为格距, U 、 V 分别是垂直和水平方向上网格的数目.

(3) 给定初值

将 WRF 的预报场的温度、露点温度和气压等气象数据引入, 计算出各个网格的水汽密度值, 其矩阵表达式为

$$IX = N, \quad (11)$$

其中 I 为单位矩阵, N 为数值预报计算出的水汽密度值. 所以最终的层析观测方程为

$$\begin{bmatrix} S \\ \mathbf{0} \\ N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F \\ Q \\ I \end{bmatrix} X, \quad (12)$$

求解未知量 X 的方法采用 Flores 等^[14] 给出的奇异值分解法.

5 气象学应用

2008 年 8 月 25 日清晨, 上海市部分地区遭遇百余年以来最强雷暴雨, 徐家汇气象站 7 时至 8 时单小时雨量达 117.5 mm, 为该站有气象记录 130 余年来所未见, 卢湾、长宁、普陀、黄浦等中心城区和浦东、闵行、崇明等地的累积雨量也均超过 100 mm 的大暴雨标准. 由于雨量过于集中, 造成全市 150 余条马路积水 10~40 cm, 11 000 余户民居进水, 暴雨还造成上海虹桥、浦东两机场各百余航班延误, 长途班车 400 多个班次晚点.

上海中心气象台 05:54 和 06:25 先后发布雷电和暴雨黄色预警信号, 07:31 更新暴雨黄色预警信号为暴雨橙色预警信号. 下面我们分别用常规的气象监测手段和 GPS 相关的监测来分析这场大暴雨.

图 2 是 2008 年 8 月 24 日 20 时, WRF 模式逐 3 h 预报的次日 5 时至 8 时共 3 h 的降水量分布图. 由图 2 可以看出, 上海大部分地区都处于小于 10 mm 的小雨区, 北部靠近崇明岛附近部分区域有超过 25 mm 的大雨区, 超过 50 mm 的暴雨区主要分布在上海东南部海上.

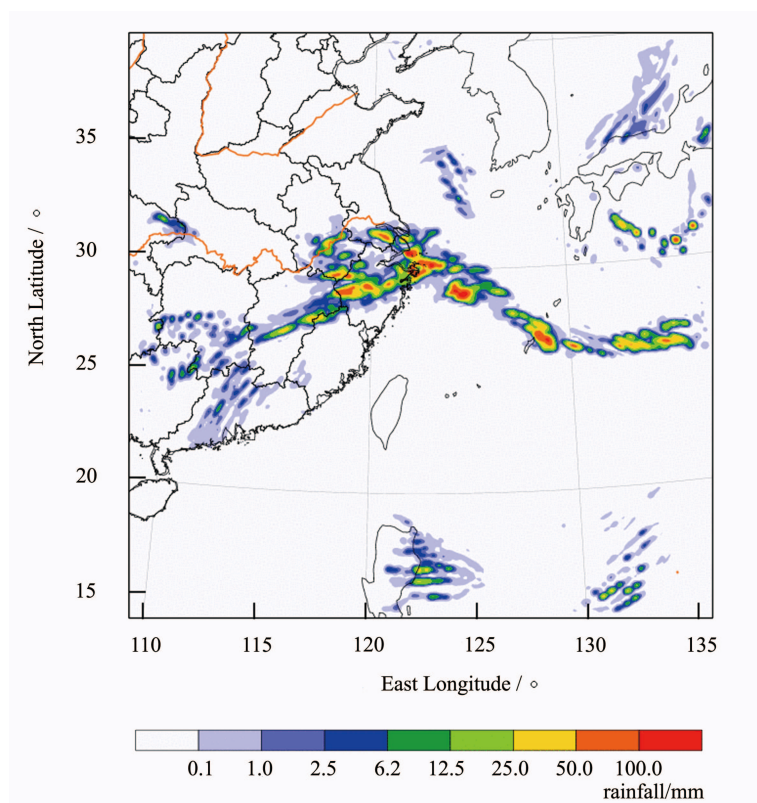


图 2 WRF 模式预报的 2008 年 8 月 25 日 5 时至 8 时的降水量分布图

Fig. 2 The 3-hour total precipitation of 2008-08-25T5—T8 predicted by WRF (Weather Research Forecast) model

图 3 是 2008 年 8 月 25 日早上的雷达回波图. 从图 3 上可以看出雨区的强度和移动过程, 在早上 05:48, 主要的降雨区还是呈 3 小片区域分布 (见图 (a) 中的 a, b, c 标示区域), 在 07:34 时, 雨区连成一片, 主要的降雨区位于上海的西北部 and 江苏的南部 (见图 (b)). 此时, 上海市区实际的降水已经超过 50 mm, 快要达到大暴雨的程度, 但是单从雷达回波上看, 整片雨区都没有强度超过 45 dB 的强回波存在.

图 4 反映了 PW 的相关信息, 图 4(a) 为大暴雨过程中, 07:30 时长三角地区的水汽分布图 (横轴为经度, 纵轴为纬度), 图 4(b) 为发生了大暴雨的徐家汇单站的 7 d 时序图 (横轴为时间, 纵轴为 PW 值), 图 4(b) 中的数值为 55 mm 的横线是根据历年降雨和 PW 关系统计出来的降水警戒线. 从图 4 中反映的整层水汽的信息, 并不能体现这次大暴雨的特征, 水汽值仅仅超过警戒线 10 mm 左右, 和夏季一般降水时的数值大致相当.

图 5 为运用本文介绍的方法, 获得的 2008 年 8 月 24 日 19 时和 2008 年 8 月 25 日 7 时的上海地区的三维水汽密度分布图. 从图上可以看出到 24 日 19 时 (图 (a)) 高层水汽

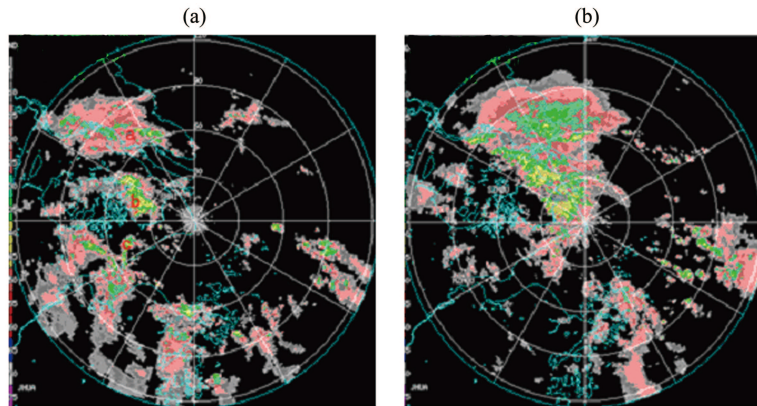


图 3 2008 年 8 月 25 日 05:48 (a) 和 07:34 (b) 的雷达基本反射率

Fig3 The radar basic reflectivity factor at 2008-08-25T05:48 (a) and T07:34 (b)

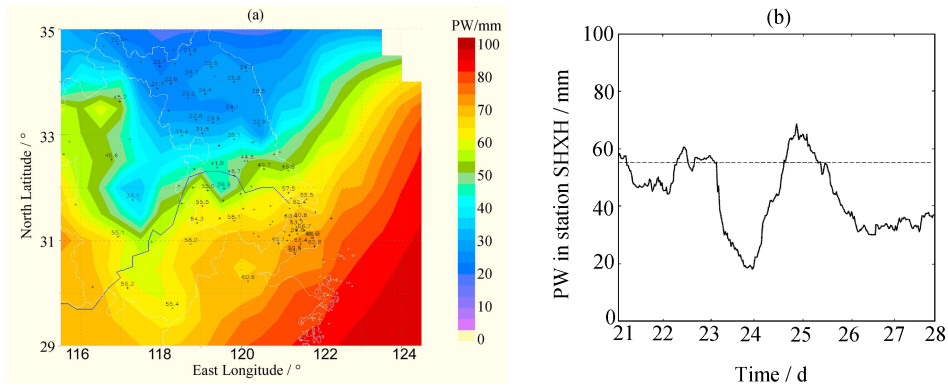


图 4 2008 年 8 月 25 日 07:30 时长三角地区 PW 分布图 (a) 和上海徐汇站 PW 的 7 d 时序图 (b)

Fig4 The distribution of PW (Precipitable Water vapor) in Yangzi Delta (a) and the 7-day series of PW in SHXH (b) at 2008-08-25T07:30

分布比较均匀,水汽主要集中在底层 3 km 下,没有对流发展的迹象.到 25 日 7 时(图(b)),12 h 之内,从中低层的水汽密度值迅速上升,对流发展旺盛.所以虽然整层的水汽含量没有非常明显的升高,但是中低层的水汽含量迅速升高,导致了凌晨的大暴雨.三维的水汽密度分布图可以给预报员提供垂直方向上的水汽信息,这是常规的探测手段所不能提供的.

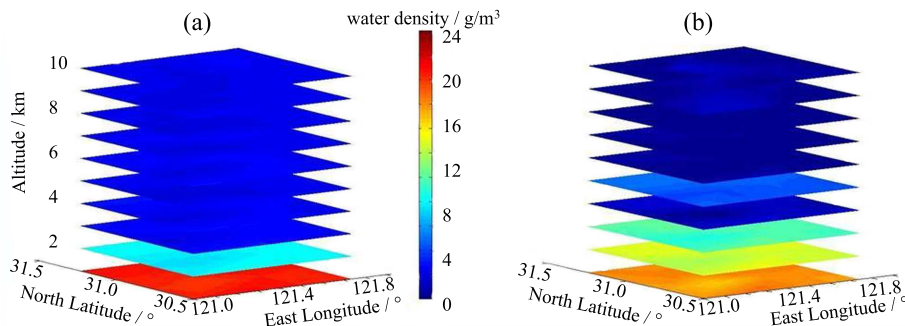


图 5 2008 年 8 月 24 日 19 时 (a) 和 2008 年 8 月 25 日 7 时 (b) 的上海地区的三维水汽密度分布

Fig 5 The 3D distribution of water vapor density in Shanghai at 2008-08-24T19 (a) and 2008-08-25T7 (b)

6 结论和展望

本文在上海地区稠密的地基 GPS 网的基础上提出了上海地区水汽三维层析的方法,并且利用该方法给出了 2008 年 8 月 25 日大暴雨期间的层析结果,对该结果进行了气象学分析,以及和其它探测手段的对比分析,显示了三维的水汽信息在灾害性天气预报、预警中的作用.

本文的主要创新点在于,所使用的技术方法是综合了多种方法的优缺点,选择了一种适合于气象部门,并且可以实现业务运行的方法.本文首次将上海地区所有的地基 GPS 站点数据都运用于解算,高密度的站网使得求解的三维水汽密度结果更为合理、可靠.

而且本文结合气象部门的实际需求,在进行网格划分的时候,首次提出了配合数值预报模式的网格划分方法,给出了网格划分的基本规则.并将数值预报的分析场资料作为先验值进入求解方程,这样既保证解算结果的稳定性,又对数值预报的结果有所改进,为后期将三维的水汽资料进入数值模式做好准备.

本文所提出的方法,已经在上海地区实现业务化运行.随着全国各地越来越多的 GPS 站点建设,越来越多的城市 GPS 站点分布密度都达到了求解三维水汽分布的要求.这种技术的推广和应用,在今后局部强对流天气和城市内涝等灾害性天气中将会发挥越来越重要的作用.

参 考 文 献

- [1] 郭鹏, 蔡风景, 洪振杰, 等. 天文学报, 2004, 45: 204
- [2] Guo P, Cai F J, Hong Z J, et al. ChA&A, 2004, 28: 338
- [3] 郭鹏, 严豪健, 洪振杰, 等. 天文学报, 2005, 46: 96
- [4] Guo P, Yan H J, Hong Z J, et al. ChA&A, 2005, 29: 331
- [5] 洪振杰, 郭鹏, 严豪健, 等. 天文学报, 2006, 47: 100
- [6] Bevis M, Businger S, Herring T A, et al. JGR, 1992, 97: 15787
- [7] Braun J, Rocken C, Ware R. RaSc, 2001, 36: 459
- [8] Braun J, Rocken C, Liljegren J. JAtOT, 2003, 20: 606
- [9] 宋淑丽, 朱文耀, 程宗颐, 等. 天文学报, 2004, 45: 338
- [10] 毕研盟, 毛节泰, 刘晓阳, 等. 地球物理学报, 2006, 49: 335
- [11] Herring T A. Netherlands Geod. Commis, 1992, 36: 157
- [12] Niell A E. JGR, 1996, 101: 3227
- [13] Bar-Sever Y E, Kroger P M, Borjesson J A. JGRB, 1998, 103: 5019
- [14] Flores A, Rius A, Ruffini G. AGp, 2000, 18: 223

The 3D Tomography Technique and Application of Water Vapor Using Ground-based GPS Networks in Shanghai

LIU Min¹ GUO Peng² YE Qi-xin¹ ZHANG Jie¹ ZHU Xue-song¹

(1 *Shanghai Center for Satellite Remote-sensing and Application, Shanghai 201100*)

(2 *Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030*)

ABSTRACT Precipitable water vapor (PW) is a column average of atmospheric water vapor over both space and time and is estimated by GPS (Global Positioning System). The signals from GPS are used to retrieve the integrated quantity of water vapor along the path between a transmitting satellite and a receiving station. This quantity is called slant water vapor (SW). Measurements of SW allow for an improved assessment of the spatial distribution of water vapor within the atmosphere, which is called tomography technique.

These are the main methods of remote-sensing water vapor by GPS. There are dense networks of GPS stations in Shanghai. These networks are used to assess the 3D distributions of water vapor. Taking a heavy storm in the city center on Aug. 25th 2008 as an example, the 3D distributions of water vapor supply more information for the weather analyses compared with the traditional atmospheric sounding ways. It is proved that the tomography technique is very useful for the disastrous weather.

Key words astrometry, atmospheric effects, methods: numerical