

# 上海 GPS 网层析水汽三维分布改善数值预报湿度场

宋淑丽 朱文耀 丁金才 彭军还

(中国科学院上海天文台, 上海 200030; 中国科学院空间科学研究与应用中心, 北京 100080; 上海中心气象台, 上海 200030; 重庆大学土木工程学院, 重庆 400044 E-mail: [slsong@shao.ac.cn](mailto:slsong@shao.ac.cn))

**摘要** 水汽三维分布信息是数值天气预报模式的初始条件之一, 大气中的水汽具有较强的时空变化特性, 传统观测手段受时空分辨率的限制, 对模式初始水汽场的描述远远不够. 利用地基 GPS 信号斜路径观测值探测水汽垂直剖面信息是目前国际上的研究前沿, 利用上海 GPS 综合应用网 GPS 信号斜路径水汽观测值, 在国内首次层析了上海地区水汽三维分布. 层析中采用高斯加权函数进行水平约束, 利用数值预报结果做先验值, 考虑了边界条件. 针对无法准确给出各类观测信息先验权的问题, 在层析水汽三维分布问题中首次采用了方差分量估计, 进行验后定权; 为了降低观测噪声对参数估计的影响, 采用了抗差估计; 针对水汽密度随高度减小的特点, 垂直方向上采用随高度变化的非等权约束方法. 层析结果与 MM5 数值预报结果比较, GPS 信号斜路径水汽观测值对数值模式的预报湿度场有明显改善, 利用 GPS 信号斜路径水汽观测值准实时地探测水汽的三维分布, 应用于短期数值预报中, 可改善短期预报的初始湿度场, 提高数值预报的准确度.

**关键词** 上海 GPS 综合应用网 GPS 信号斜路径水汽观测值 层析技术 水汽三维分布 方差分量抗差估计

大气中水汽的垂直分布信息对于校正和改善中尺度数值预报模式的初始湿度场极为重要. 目前数值预报初始场中所用的水汽三维信息主要依靠探空站提供的水汽剖面, 但是探空站之间的间距均在 200~300 km 以上, 并且常规的探空站一天只有间隔 12 h 的两次观测, 这样的时空密度很难捕捉空间尺度小于 100 km 的中尺度暴雨系统和满足准实时的短期天气预报, 而由气象卫星资料直接反演的水汽精度比较低. 地基 GPS 气象网可得到准实时的测站上空高精度、高分辨率的 PWV(Precipitable water vapor) 序列<sup>[1]</sup>. 但是对于改善数值预报初始场, PWV 是测站上空可降水量的总和, 不能反映大气中水汽的三维分布情况. 一般认为, 地基 GPS 难于获得大气中水汽垂直分布的信息, 成为地基 GPS 气象学的瓶颈, 这一点大大限制了地基 GPS 网在气象学上的应用. 实际上, GPS 信号斜路径方向的水汽含量包含水汽的垂直剖面信息, 利用一个测站分布较密的 GPS 网的斜路径水汽观测值, 通过合理的层析技术应能获得水汽的三维分布情况. 近几年来国际上 Flores, Lubomir 等利用 GPS 斜路径观测值进行了水汽三维分布的层析试验, 取得了成功<sup>[2,3]</sup>, Ulrich Foelsche 等, 利用 Bayesian 方法, 进行了把模拟地基 GPS 观测值和空基掩星资料综合起来的实验, 利用层析技术, 重构了大

气三维分布信息<sup>[4]</sup>. Ha 等利用斜路径观测量改进了水汽的垂直分布, 从而提高中尺度短期数值预报的精度, 尤其是中尺度暴雨预报<sup>[5]</sup>. 但是在利用层析技术探测水汽三维分布问题中, 还存在很多难点需要解决, 比如 Lubomir 等提到, 地基 GPS 层析面临的主要困难是受限的观测值几何分布和斜路径观测值的噪声<sup>[3]</sup>.

上海地区 GPS 综合应用网于 2002 年 6 月正式运行, 14 个基准站覆盖长江三角洲, 其可准实时地提供高分辨率(采样为 30 分钟一次)、高精度(2 mm)的 PWV 序列, 应用到数值预报初始场的客观分析中, 对数值预报的结果有一定的改进作用, 连续的 PWV 序列也对长江三角洲地区季节转换(如梅雨季节)的监测提供了一种新的信息<sup>[6]</sup>. 为了充分发挥上海 GPS 网改善数值预报湿度场的作用, 我们利用该网获得的高精度 GPS 斜路径水汽观测值, 开展了上海地区探测水汽三维分布的层析工作, 为了解决层析解算中观测方程的秩亏问题, 我们用数值预报结果作为先验值, 用高斯加权函数进行水平约束. 为了准确地给出各部分信息之间的相对权和降低观测噪声对反演结果的影响, 我们在水汽三维层析问题中首次采用了方差分量抗差估计, 有效地解决了定权和降低噪声影响的问题, 克服了利用地基 GPS 观测值层析水汽三维分

布面临的主要困难;在垂直方向上,根据水汽密度的变化我们采取了加不等权的办法.层析结果与探空站提供的水汽剖面进行了比较,上海地区上空GPS的层析结果表明,GPS的斜路径观测值对数值模式的预报湿度场有明显的改善,由此可提高数值预报的准确度.

## 1 GPS 资料处理及上海地区网格划分

### 1.1 GPS 资料处理

GPS层析水汽三维分布的关键因素之一是获得GPS信号斜路径方向水汽含量观测值SWV(Slant water vapor),目前国际上计算斜路径延迟SWD(Slant wet delay)的方法主要是从GPS数据处理的后拟合残差中得到的双差方法,该方法假设GPS数据处理中各种参数已经很好地模型化,剩余的残差主要是大气中的各向异性部分和观测噪声组成.对一个GPS网处理时,先在对一条基线上所有单差残差和为零的假设下,把双差转换为单差,再假设观测到一颗卫星的所有测站间单差残差和为零,才能把单差转换成非差<sup>[7]</sup>.这种处理方法的问题是:(1)单差残差和为零假设的合理性存在一定的问题;(2)在这种假设条件下,当站坐标约束不当,天顶方向的PWV和模糊度确定不准时,误差都会放大;(3)这种处理方法,要求网中测站的数目足够多,网的覆盖范围足够大,以减少双差处理的相关性,获得每条斜路径方向对流层延迟STD(Slant troposphere delay)的准确值.双差处理的误差主要来自于天顶方向PWV和各向异性部分估计的误差.另一种方法是采用非差处理直接估计站钟差和卫星钟差,利用单频的 $L_1$ 波段观测值计算<sup>[8]</sup>,由于这种方法不能消除电离层的影响,要求有较准确的电离层改正模型.针对上述方法的缺陷,我们提出了利用无电离层影响的GPS LC非差观测组合,计算GPS信号斜路径方向水汽含量的新方法<sup>[9]</sup>.对于GPS两个波段的信号 $L_1$ 和 $L_2$ ,消除电离层后的LC观测组合为

$$N_{LC} + \phi_{LC} = |\vec{r} - \vec{R}| + d_{trop} + c(\Delta t - \Delta T) + \varepsilon_{LC}, \quad (1)$$

其中,  $N_{LC} = \frac{f_1^2 N_1 \lambda_1 - f_2^2 N_2 \lambda_2}{f_1^2 - f_2^2}$ , 为LC组合观测值的模糊度,  $\phi_{LC} = \frac{f_1^2 \phi_1 \lambda_1 - f_2^2 \phi_2 \lambda_2}{f_1^2 - f_2^2}$ , 为经周跳探测修复

预处理后的LC组合观测值,  $\varepsilon_{LC} = \frac{f_1^2 \varepsilon_1 - f_2^2 \varepsilon_2}{f_1^2 - f_2^2}$ , 为误差因素的LC组合.

在计算中,我们采用精密的站坐标和JPL提供的卫星轨道及30s的卫星钟差,站钟差利用GIPSY软件计算,(1)式中只有 $N_{LC}$ 和斜路径对流层延迟 $d_{trop}$ 是未知量,在LC组合中, $N_{LC}$ 不是整数,使其解算有一定的困难,为此我们对 $N_{LC}$ 和 $d_{trop}$ 采用迭代计算的方法,先用天顶延迟、梯度和映射函数计算 $d_{trop}$ 的初值.然后根据(1)式,利用经过周跳探测和修复后的无电离层影响的LC组合观测值计算出各个时刻的模糊度,根据在无周跳时一弧段内模糊度的唯一特性,拟和各个弧段内30s间隔计算的模糊度,消除掉随机误差的影响,确定每一弧段的平均模糊度 $\bar{N}_{LC}$ 作为计算斜路径延迟的准确值.计算时考虑了固体潮、海潮和极潮对测站坐标的影响,卫星天线相位中心改正,相对论效应对卫星钟和信号传播的影响,以及天线的电磁波右圆极化改正.用平均模糊度 $\bar{N}_{LC}$ 代替(1)式中的 $N_{LC}$ ,再用(1)式每30s估计一次各个斜路径方向的对流层延迟 $d_{trop}$ .从斜路径对流层延迟去掉干延迟后,得到斜路径方向的湿延迟SWD,然后根据地面气象参数,计算出斜路径方向的水汽含量SWV.这种方法得到的SWV与水汽辐射计WVR观测结果比较,精度可达亚厘米量级.图1是上海GPS综合应用网14个基准站5min观测的斜路径方向的水汽含量.

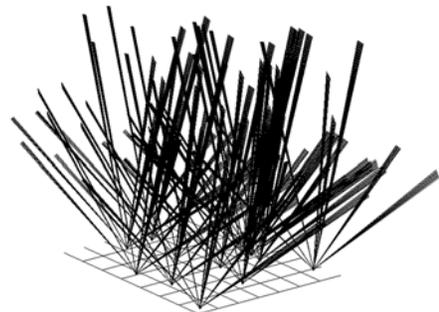


图1 上海GPS综合应用网14个基准站5min内斜路径方向的水汽含量

### 1.2 上海地区网格划分

因为层析技术利用的观测值一般是沿信号方向各部分信息在研究区域内的积分,要获取各个部分的离散信息,一般把所研究的区域划分成若干三维网格,把问题离散化.分布在长江三角洲地区的上

海 GPS 综合应用网的 14 个基准站之间的距离在 20~200 km 之间, 上海地区 5 个基准站之间的距离为 13~37 km, 平均为 23 km, 我们所要研究的区域是上海上空 60 km×60 km×10 km 范围. 顾及到要用数值模式预报结果做先验值, 我们根据中尺度数值预报模式 MM5 网格的大小进行了网格划分, 网格水平间距为 0.13° (约 15 km), 垂直方向分成 20 层, 每层厚度 500 m, 上海地区共划分为 4×4×20 个网格, 如图 2 所示.

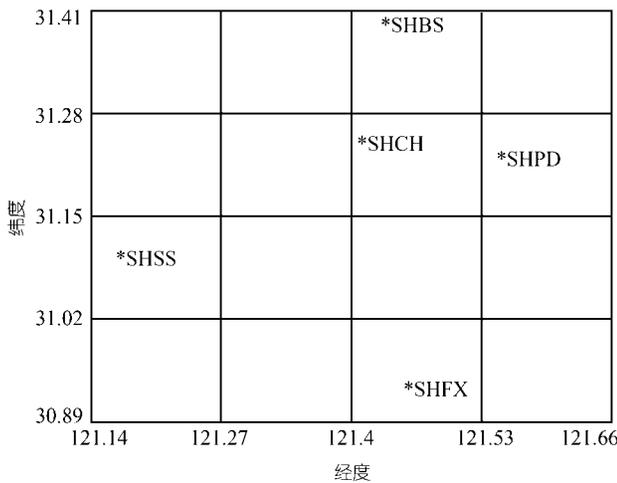


图 2 站点分布和网格划分图  
自左至右为第一列~第四列, 自下至上为第一行~第四行

## 2 层析方法

利用一定研究区域内不同方向和位置的积分观测值反演各部分信息的方法称为层析技术, 层析技术已经成功地应用于医学、地震和海洋等研究领域<sup>[3]</sup>. 层析问题中, 因为观测值是观测路径上各部分信息的积分, 一般利用划分网格的形式把问题离散化. 比如在层析水汽三维分布的问题中, 观测值是 GPS 信号斜路径方向上水汽密度的积分, 为了得到研究区域上空水汽的三维分布信息, 我们认为所划分的每一个网格内的水汽密度是均匀的, 在解算时设为一个未知参数, 根据 GPS SWV 信号在所经过网格内穿过的长度, 列出观测方程. 在平稳假设下, 认为在一段时间内水汽密度是不变的, 一般观测方程的个数大于待估参数的个数, 但是由于观测值是待估参数沿信号路径方向的积分, 待估参数间存在相关性, 问题不能得到唯一解, 所以我们利用数值预报结果作为背景场, 提供先验值和垂直方向的约束. 另外, 由于观测值分布不均匀, 某些网格无观测值通过, 针对

这个问题我们采用相关函数进行水平约束. 根据研究区域内的常规观测资料, 我们确定了最上层的边界条件. 综合观测方程和各种约束条件我们利用上海 GPS 综合应用网斜路径观测值进行了上海地区的水汽层析工作, 具体层析方法如下.

### 2.1 观测方程

如图 3 所示, 把所研究的区域划分成若干网格, 设每一个网格内的水汽密度为  $x_{i,j,k}$ , 第  $p$  条信号穿过该网格的长度为  $a_{i,j,k}^p$ . 设层析范围内东西网格数为  $ne$ , 南北网格数为  $nn$ , 高程方向层数为  $nu$ , 则第  $p$  个观测值对应的观测方程为

$$\sum_{i=1}^{ne} \sum_{j=1}^{nn} \sum_{k=1}^{nu} a_{i,j,k}^p x_{i,j,k} = swv^p, \quad (2)$$

式中  $swv^p$  代表 GPS 信号斜路径方向的水汽含量,  $i, j, k$  表示网格的三维坐标.

因为观测方程是根据斜路径水汽等于 GPS 信号方向上各个网格内水汽的总和列出的, 所以只选用从顶层穿出的观测值, 舍去了从研究区域侧面穿出的观测值, 当然这样会造成边界效应问题. 对于上海地区 4×4×20 的网格划分和 5 个连续观测站, 5 min 的观测中大概有 300 个斜路径观测穿过顶层, 15 min 大概有 460 个, 所以层析的时间步长至少要为 15 min. 尽管观测值的个数大于未知参数的个数, 但由于有些网格无观测值通过, 更重要的是观测方程(2)的观测值 SWV 是斜路径方向累积的水汽含量, 方程(2)实际是秩亏的, 无法直接求解. 为此需要其他的辅助信息, 例如水平约束、垂直约束、边界条件和先验信息等.

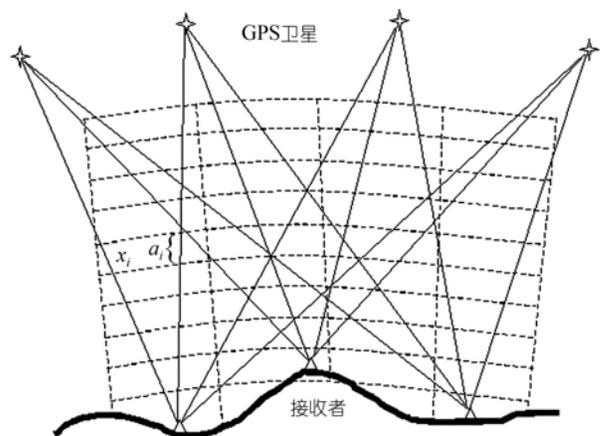


图 3 GPS 层析水汽原理示意图

2.2 水平约束

对于上海地区小范围内, 在没有前锋通过时, 我们认为水汽的水平分布是平稳的, 根据距离越近相关性越强的原则, 采用了高斯加权函数进行水平约束. 约束方程如下:

$$HX = 0,$$

式中,  $X$  为未知参数向量,  $H$  为水平约束方程系数阵, 其元素利用下式计算,

$$h_{i,j,k}^{il,jl,kl} = -\frac{e^{-\frac{d_{il,jl,kl}^2}{2\sigma^2}}}{\sum_{il=1}^{ne} \sum_{jl=1}^{nm} e^{-\frac{d_{il,jl,kl}^2}{2\sigma^2}}}, \quad (3)$$

式中,  $i, j, k$  代表所计算网格的位置,  $il, jl, kl$  代表其他网格的位置,  $d_{il,jl,kl}$  为其他网格到所计算网格的距离.

2.3 先验信息和边界条件

在利用网格的形式把积分观测值离散化时, 垂直方向上如果不借助于物理模型, 每条观测路径上选择的参数之间是相关的, 无法确定合理的剖面信息, Flores等人<sup>[2]</sup>借助探空资料提供的剖面建立垂直约束方程. 考虑到探空资料的时空分辨率比较低, 我们采用了数值预报结果作为背景场, 提供垂直方向上的先验信息. 根据数值预报输出的等压面上的高度, 把每个格网点上的温度和比湿内插到层析的各高度上, 并计算出各个网格内的预报水汽密度作为层析的先验值. 探空提供的剖面显示水汽一般主要集中在 2~3 km 以下, 6 km 以上水汽密度减少很快, 对于上海地区在 10 km 高度附近接近于  $0.1 \text{ g/m}^3$ , 对于上边界我们附加了水汽密度等于  $0.1 \text{ g/m}^3$  的约束条件.

3 方差分量抗差估计验后定权

层析问题就是把上面描述的约束方程当作附加观测方程与GPS观测方程一起组成层析模型进行解算, 为了保证待估参数的可靠性和效率, 需要合理地给出各类观测方程之间的相对权. Flores.A等根据观测值精度和一般情况下参数估计能达到的精度计算最小特征值的截止值, 调整权, 使权最小时, 最小特征值大于截止值. 这时候截止值的含义是观测值穿过网格的最小有效长度, 即只有穿过的长度大于该值时, 观测值才能超出噪声水平提供有用信息, 并且有效长度等于截止值除以穿过同一网格的平均观测值数的平方根<sup>[2]</sup>. 但在此问题中各类观测值的方差

不能在平差前准确给出, 不能给出准确的先验权. 所以我们采用了方差分量估计, 利用平差后的残差信息计算各类观测的方差分量, 根据验后的方差分量重新确定各类观测之间的相对权. 由于水汽密度随高度增加递减很快, 在上海地区 8 月份底层水汽密度大于  $20 \text{ g/m}^3$ , 6 km 以上小于  $1 \text{ g/m}^3$ , 量级差别较大, 所以在垂直方向上我们采用了随高度增加的加权方法.

如前所述, 利用 GPS 信号斜路径水汽观测值层析水汽三维分布的模型中, 由于上海地区测站较少且分布不均匀, 观测结构不合理, 所选的未知参数之间存在相关性, 法方程系数阵性能不好, 会放大观测噪声对计算结果的影响. 由于受钟差等因素的影响, GPS 斜路径观测值中存在粗差, 而水汽的强时变特性限制了观测时段的长度, 使得观测值比较少. 所以为了尽量保留可用信息, 降低观测噪声对参数估计的影响, 我们采用了抗差估计. 图 4 以 08 月 24 日 08 时的层析为例, 从图 4(a)可以看出, 不剔除野值直接估计时, 由于受粗差的影响, 使得估计参数有明显的跳变; 如果为了避免粗差的影响剔除大量的观测值, 使得层析结果偏离探空剖面, 观测信息明显不够, 如图 4(b)所示; 若采用抗差方法, 如图 4(c)所示, 可以看出对参数估计比较有利, 层析结果与探空剖面符

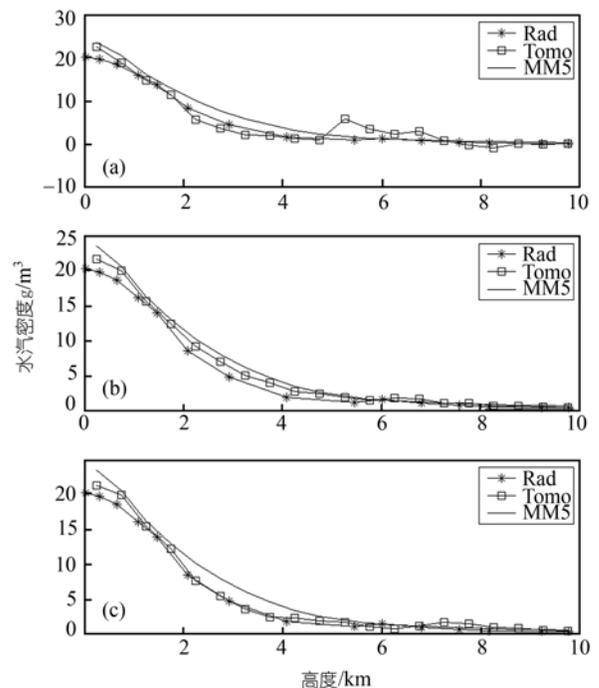


图 4 抗差估计在层析问题中的应用  
Rad: 探空剖面, Tomo: 层析结果, MM5: 数值预报

合的比较好。

#### 4 层析结果

根据上面的层析方法, 利用上海地区 5 个连续 GPS 观测站斜路径水汽观测值进行了层析实验. 下面给出了 2002 年 8 月 07 日和 24 日的层析结果, 这两个层析例子是以 20 时的数值模式初始场预报 12 h 后的 07 日 08 时和 24 日 08 时的预报湿度场作为背景场. 根据上海宝山、测绘院、浦东和佘山站的降雨记录(缺奉贤站降雨资料), 07 日上海地区有降雨过程, 07 日 7 时宝山和测绘院的每小时雨量分别为 0.1 和 0.2 mm; 两站 11 时和 12 时的降雨分别为 0.1, 0.4 和 0.2, 1.0 mm, 这期间浦东和佘山无降雨; 13 时测绘院和浦东的每小时雨量分别达 11.2 和 23.4 mm, 宝山和佘山分别为 0.4, 0.1 mm. 在 24 日, 21 时以前上海地区均无降雨.

图 5 和图 6 分别是 2002 年 8 月 07 日 08 时和 24 日 08 时利用 15 分钟 GPS 资料层析的结果, 两个图是上海地区沿东西方向的水汽剖面, 与图 2 中的 4×4 网格划分相对应. 为了检验层析得到的水汽三维分布, 我们把 07 日 08 时和 24 日 08 时的层析结果与两个时刻上海宝山探空站提供的水汽垂直剖面进行了比较,

如图 7 和图 8 所示, 在两图中左图是释放探空气球的宝山站所在网格, 右图是根据风向和风速判定的探空气球经过的网格. 从图中可以看出, 与数值预报湿度场相比, 层析的水汽剖面与探空资料符合的比较好, 特别在 1~7 km 高度上数值预报与探空差别相对较大, 利用 GPS 观测值进行层析后得到的剖面在该高度范围内对预报场有明显的改进. 统计结果表明, 在 1~7 km 高度范围内, 上海宝山地区层析结果相对于探空资料, 07 日 08 时的 RMS 和 BIAS 分别为  $0.53 \text{ g/m}^3$  和  $-0.08 \text{ g/m}^3$ , 24 日 08 时的 RMS 和 BIAS 分别为  $0.67 \text{ g/m}^3$  和  $-0.85 \text{ g/m}^3$ ; 而两个时刻的数值预报结果相对于探空资料, 07 日 08 时的 RMS 和 BIAS 分别为  $1.31 \text{ g/m}^3$  和  $1.23 \text{ g/m}^3$ , 24 日 08 时的 RMS 和 BIAS 分别为  $1.56 \text{ g/m}^3$  和  $-1.27 \text{ g/m}^3$ . 可以看出利用 GPS 斜路径水汽观测值层析得到的水汽三维结构对数值预报的预报湿度场有明显改进, 特别是当数值预报的结果误差较大时, GPS 斜路径水汽观测值的作用更明显. 另外, 作者在反演过程中发现, 对于这两个无明显天气过程的时刻, 利用 15 分钟和稍长时间的资料反演结果区别不大, 而对于有强烈天气过程的时段反演结果相对较差, 我们认为需要进一步缩小

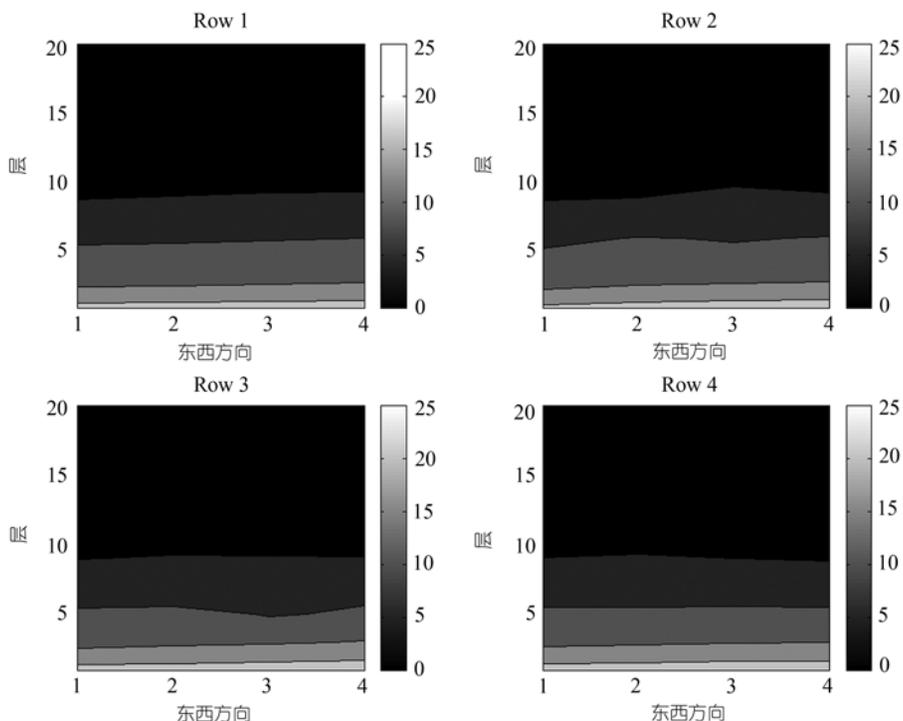


图 5 2002 年 8 月 07 号 08 时上海地区层析剖面图

左上图是图 2 中对应的下面第一行四个网格的剖面, 右上对应第二行, 左下对应第三行, 右下对应第四行. 水汽密度单位:  $\text{g/m}^3$

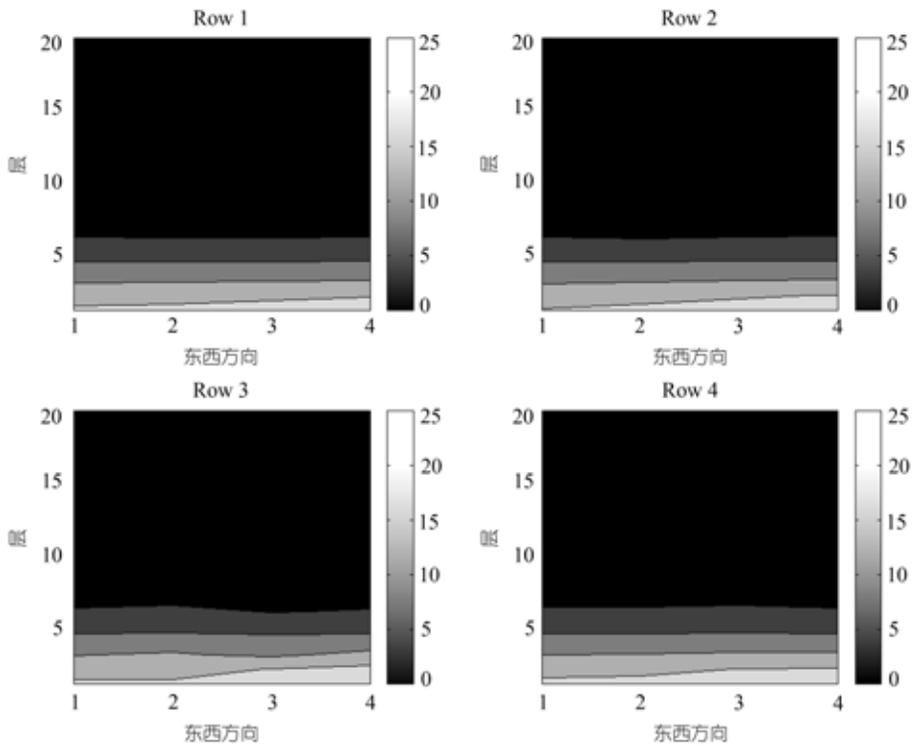


图 6 2002 年 8 月 24 号 08 时上海地区层析剖面图

左上图是图 2 中对应的下面第一行四个网格的剖面, 右上对应第二行, 左下对应第三行, 右下对应第四行. 水汽密度单位:  $g/m^3$

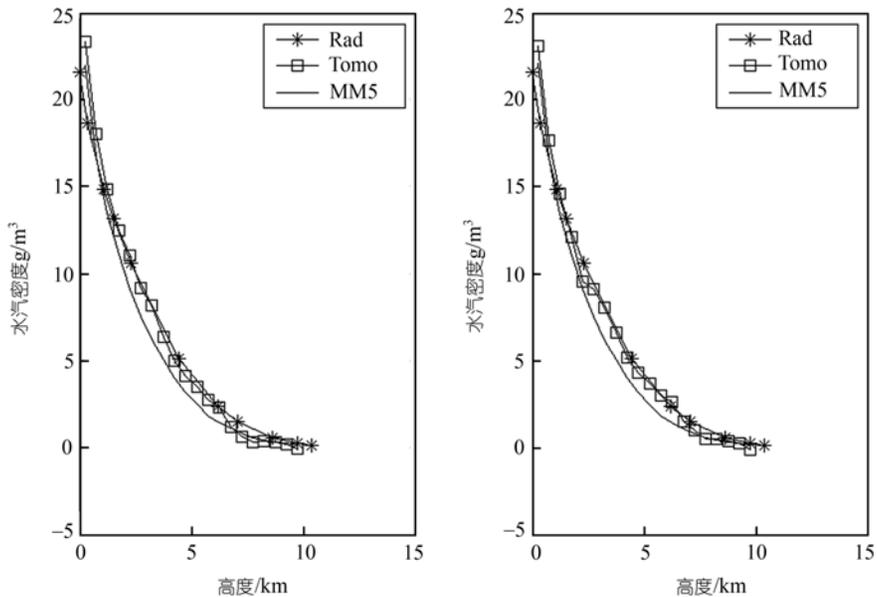


图 7 2002 年 8 月 07 号 08 时上海宝山地区层析剖面与探空廓线比较

左图: 释放探空气球的宝山地区, 图 2 中的 4-3 网格; 右图: 探空气球经过的图 2 中的 3-3 网格

平稳假设的时空尺度, 将在其它文章中详细讨论这种情况. 从图 7 和图 8 也可以看出, 在 1 km 以下层析结果对预报场改善不大, 我们认为主要是因为底层

GPS 观测值比较少, 通过降低低高度角观测值噪声, 充分利用更多的 GPS 斜路径观测信息, 有望改善底部层析结果.

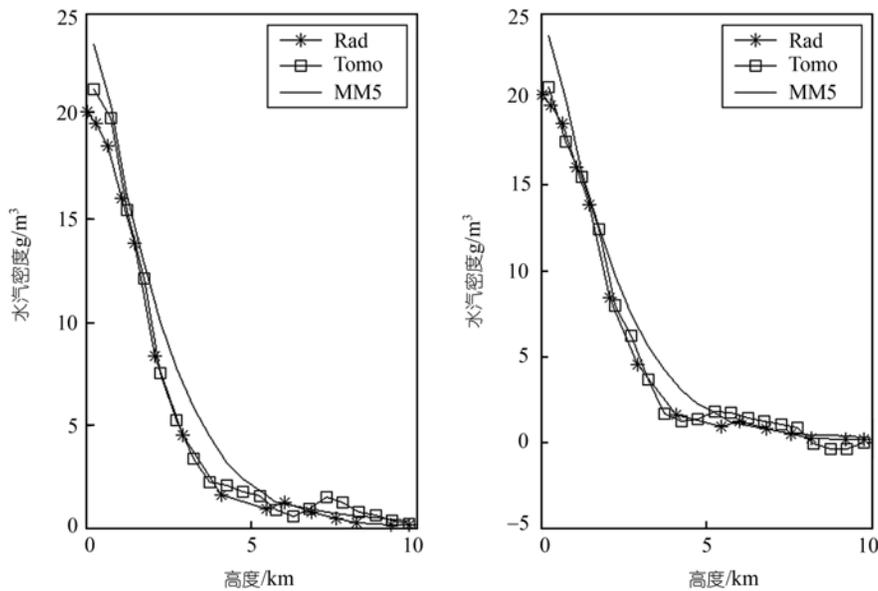


图 8 2002 年 8 月 24 号 08 时上海宝山地区层析剖面与探空廓线比较  
左图: 释放探空气球的宝山地区, 图 2 中的 4-3 网格; 右图: 探空气球经过的图 2 中的 3-2 网格

### 5 结论

在国内首次利用上海 GPS 综合应用网的斜路径水汽观测值 SWV, 通过层析技术, 获取了上海地区的水汽三维分布信息, 层析的水汽剖面对数值预报湿度场有明显改进, 与探空剖面符合的很好. 层析过程中我们采用了方差分量抗差估计检验后确定各类观测方程的权重, 降低粗差对计算结果的影响, 尽量保留可利用信息. 利用层析的水汽剖面改善数值预报的湿度场, 可为提高中尺度暴雨短期数值预报的精度提供良好的初值条件. 四维水汽场还可以用来估计湖泊河流流域的水汽通量, 提高水文模式预报流域流量和洪水的能力. 通过降低低高度角观测值噪声, 充分利用更多的 GPS 斜路径观测信息, 有望改善底部层析结果.

### 参 考 文 献

- 1 李成才, 毛节泰, 李建国, 等. 科学通报, 1999, 44(3): 333~336
- 2 Flores A, Ruffini G, Rius A. 4D tropospheric tomography using GPS slant wet delays. Annales Geophysicae, 2000, 18: 223~234
- 3 Lubomir P, Per JarLemark. Ground-Based GPS Tomography of

water vapor: analysis of simulated and real data. Special issue of the Journal of the Meteorological Society of Japan, 2004, 82(1): 551~560

- 4 Ulrich Foelsche. Tropospheric water vapor imaging by combination of ground-based and spaceborne GNSS sounding data. J Geophys Res, 2001, 106(D21): 27221~27231 [DOI]
- 5 Ha S Y, Guo Y R, Roken C. Comparison of GPS Slant Wet Delay Measurements with Model Simulations during the Passage of a Squall Line. Geophys Res Lett, 2002, 29(23): 2113~2116 [DOI]
- 6 宋淑丽, 朱文耀, 丁金才, 等. SGCAN 对 PWV 的实时监测及其改进数值预报初始场的试验. 地球物理学报, 2004, 47(4): 631~638
- 7 Shoji Y, Nakamura H, Iwabuchi T, et al. Tsukuba GPS Dense Net Campaign Observation: Improvement of GPS analysis of slant path delay by stacking one-way postfit phase residuals. Proceeding of International Workshop on GPS Meteorology, Japan, 2003, 1-05-1~1-05-6
- 8 Rocken C, Braun J, Vanhove T, et al. Developments in ground-based GPS Meteorology. Proceeding of International Workshop on GPS Meteorology, Japan, 2003, 1-01-1~1-01-6
- 9 宋淑丽, 朱文耀, 廖新浩, 等. GPS 信号斜路径方向水汽含量的计算方法. 天文学报, 2004, 47(3): 338~346

(2005-02-18 收稿, 2005-05-20 收修稿)