# 利用 GPS 的倾斜路径观测暴雨过程中的水汽空间分布

毕研盟1,2 毛节泰1 李成才1 符 养1

1 北京大学物理学院大气科学系,北京 100871
 2 国家卫星气象中心,北京 100081

**摘 要**介绍了地基全球定位系统 (GPS) 沿倾斜路径方向观测水汽总量 (SWV) 的原理和方法;不同时间和不同地点的 GPS SWV 与微波辐射计反演的 SWV 符合较好,误差在 3 mm 左右,表明 GPS 可以较高的精度探测 SWV。计算了区域 GPS 观测网在一次暴雨过程中不同空间方位上的水汽观测结果,为消除不同路径对 SWV 的影响,把 SWV 转化为天顶方向的值 VSWV;分析了同一 GPS 站点对不同卫星方向 VSWV 的变化情况,以及不同 GPS 站点对同一个卫星方向 VSWV 的关系。结果表明,区域 GPS 观测网中倾斜路径观测可较好地探测不同方位上水汽的分布和变化;SWV 相对于天顶方向的大气水汽总量 PW 而言,能更好地代表真实大气水汽分布;在探空或卫星观测等传统观测手段无法探测的情况下,GPS SWV 数据可提供中小尺度暴雨结构中水汽分布和变化状况等有用信息。

关键词 全球定位系统 遥感 倾斜路径 水汽 文章编号 1006-9895 (2006) 06-1169-08 中图分类号 P426 文献标识码 A

### Spatial Distribution of Water Vapor Observed with GPS Along Slant Path in a Storm System

BI Yan-Meng<sup>1,2</sup>, MAO Jie-Tai<sup>1</sup>, LI Cheng-Cai<sup>1</sup>, and FU Yang<sup>1</sup>

Department of Atmospheric Science, School of Physics, Peking University, Beijing 100871
 National Satellite Meteorological Center, Beijing 100081

**Abstract** Water vapor plays a major role in atmospheric processes but remains difficult to quantify due to its variability at small temporal and spatial scales and the spares set of measurement tools. GPS has proved its ability to monitor the precipitable water vapor at zenith with the same accuracy as other methods. Recent studies have shown that GPS also has the capacity to measure the tropospheric water vapor amount in the line of sight of GPS satellite. This observation can be used to study the nonisotropic distribution of water vapor in space. In this paper, the theory and method of sensing integrated slant path water vapor (SWV) along ray path with ground-based GPS are introduced. The zenith delay is obtained above GPS sites, and then the mapping function and horizontal gradients are used, which are a set of atmospheric parameters estimated by GPS software, to model the water vapor amount along slant path between GPS receiver and GPS satellites. The measurements made at different sites and different time with GPS and water vapor radiometer (WVR) show that RMS error between GPS and WVR is about 3 – 4 mm. The agreement of SWV as measured by GPS and WVR demonstrates the ability of GPS to resolve SWV with high accuracy. In a heavy storm happening in Beijing region, a local GPS network containing 6 GPS sites is used to calculate the zenith precipitable water vapor (PW) and SWV at different paths, SWV is converted to the value at the vertical zenith direction (VSWV). The variation of VSWV from the same site to different GPS satellites is analyzed, and the

**收稿日期** 2005-05-16, 2006-01-04 收修定稿

作者简介 毕研盟, 男, 1979年出生, 博士研究生, 主要研究方向为 GPS 气象学。E-mail: biym@nsmc. cma. gov. cn

relationship of VSWV from different GPS sites to the same satellite is also presented. The result shows that the distribution and variation of water vapor amount at different directions can be well determined in a local GPS network using the observed GPS SWV. This result is supported by the spatial distribution of GPS PW measured during this storm. When the traditional observation such as radiosondes or satellites cannot work, GPS SWV can provide the useful information of water vapor distribution and variation in the meso-scale storm structure. SWV is a better representation of the actual atmospheric water vapor distribution than PW because SWV contains three dimensional information of water vapor. Using tomographic technique, the three dimensional information of water vapor can be retrieved. Besides the application in water vapor tomography, GPS SWV can be used in many studies, for example, many atmospheric phenomena associated with water vapor transfer, numerical weather prediction and synthetic aperture radar (SAR).

Key words GPS, remote sensing, slant path, water vapor

### 1 引言

水汽在大气成分中占有非常重要的地位。首 先,水汽是一种重要的温室气体,是气候变化的一 个重要因子;另一方面,水汽在各种天气过程中也 扮演重要的角色。水汽存在相变,在这一过程中将 会吸收或释放大量的热量,水汽是降水的来源,其 变化可强烈影响大气垂直稳定度及风暴系统的发展 演变。长期以来,水汽探测依赖于探空或卫星遥感 等观测手段,由于水汽在较小的时空尺度上存在很 大的变化,传统方法难以捕捉水汽的这些变化特 征,使得在各种大气现象的研究中缺乏足够的和精 确的水汽资料。全球定位系统(Global Positioning System,简称 GPS)的发展为大气水汽的探测提供 了一种全新的方法。

应用地基 GPS 测量方法,在 GPS 接收机和卫 星之间沿倾斜路径方向观测大气水汽总量,可以提 供精确而细致的水汽观测资料,这种在倾斜的信号 路径方向或在线状视野内观测的单位面积上的积分 水汽总量,被称为"倾斜路径水汽总量(Slant path Water Vapor,简称 SWV)"<sup>[1]</sup>。SWV 观测的应用 之一是在稠密的区域 GPS 观测网中,测量每一站 点至所有可见卫星的信号路径上的水汽量,进而组 合这些观测量,反演出大气水汽的空间三维分布, 即水汽层析<sup>[2]</sup>。这将解决 GPS 观测水汽发展初期 时,只能提供站点上空一维水汽信息的问题,使得 地基 GPS 气象学进一步向前发展。

地基GPS观测大气水汽总量或可降水量(Precipitable Water,简称 PW)可达很高的精度和时 间分辨率,这一点已由国内外的众多实验所证 实<sup>[3~5]</sup>。但遗憾的是,PW只是站点上空一维气柱 总量的水汽变化信息,众多的大气科学研究和应用 需要确知水汽的三维空间分布。Bevis 等<sup>[6]</sup> 阐明了 GPS 应用于大气遥感探测的概念,其中提到应用 GPS 信号路径上的观测有可能获得水汽空间分布 信息。Ware 等<sup>[7]</sup>则首先开始了 GPS SWV 这方面 的探索工作,利用双差观测量初步证明了 GPS SWV 观测方法的可能性。Alber 等<sup>[8]</sup>和 Braun 等<sup>[9]</sup>在这方面也进行了卓有成效的工作,他们进行 的 GPS 与微波辐射计的对比观测表明, GPS 完全 有能力进行倾斜路径上的水汽观测工作。

GPS 观测是一种全天候的方法。强烈降雨等 恶劣天气现象是大气科学的一项重要研究内容,利 用传统观测手段易受云雨影响无法进行有效的观 测,而 GPS 观测不受云雨的影响。SWV 观测除可 应用在对流层水汽层析中外,在许多天气现象的研 究中也有很好的应用前景,比如,低空急流水汽输 送、深对流发展、锋面过境天气系统发生快速变化 的情况<sup>[10]</sup>。另外,SWV 还应用在改正 GPS 大地测 量误差、合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar,简称 SAR)成像等方面。其他研究发现, SWV 数据同化到中尺度数值预报模式中,有助于 重构水汽的三维分布,从而提高模式预报精度<sup>[11]</sup>。

本文首先概括介绍 GPS 观测 SWV 的原理和 方法,以及我们在倾斜路径方向观测 SWV 的实验 结果。作为 GPS SWV 的应用,我们利用区域 GPS 观测网观测结果,讨论了在北京地区一次大暴雨发 生时,暴雨系统中的水汽空间分布情况,最后给出 了结论。

### 2 利用 GPS 观测倾斜路径水汽总量 的原理和方法

从 GPS 卫星发射的两种 L 波段的信号, 穿越

大气层被 GPS 接收机所接收的过程中, 会受到大 气中水汽引起的延迟作用, 这种延迟以 S<sub>WD</sub>(Slant path Wet Delay, 简称 SWD) 表示:

$$S_{\rm WD} = 10^{-6} \int_a^l N_{\rm w} {\rm d}s,$$

其中, N<sub>w</sub> 为湿折射率, 积分下限 a 代表接收天线 位置, 上限 l 代表 GPS 卫星位置, s 代表信号所经 过的路径, 积分从 GPS 接收天线到 GPS 卫星。 SWV 与 SWD 有如下的正比关系:

$$S_{\rm WV} = \Pi S_{\rm WD},$$

Π为无量纲的比例因子,其值受大气状况影响,约为0.15 左右,上式将延迟量转换为水汽总量。

从概念上来讲, SWV 与 PW 有相似之处,皆 为空气中的柱水汽总量,不同之处在于 SWV 为偏 离天顶方向的单位面积空气柱中的水汽总量。 SWV 观测可看作两部分之和,第一部分是垂直积 分水汽 PW 部分,它代表了大气水汽各向同性部 分,目前,这一部分的反演工作已经较为成熟,正 向实时化和业务化应用发展<sup>[12]</sup>; SWV 的第二部分 为水汽各向异性部分,即对各向同性部分 PW 的偏 离。所以 SWV 可以表达为

 $S_{WVi}^{j} = m(\theta_{i}^{j}) P_{Wi} + S_{i}^{j},$ 

 $S_{WVi}^{i}$ 为仰角 $\theta$ 方向、站点i与卫星j信号路径上的 大气水汽总量, $P_{Wi}$ 为测站i上空的水汽总量,  $m(\theta_{i}^{i})$ 为映射函数, $S_{i}^{i}$ 为观测站点i与卫星j之间大 气水汽的非各向同性成分。

显然,得到SWV的关键在于如何得到第二部 分Si。这一部分可从GPS数据处理当中的相位残 差中获得。采用不同的GPS数据处理方法,得到 Si项的方法也不相同,主要可分为两种,一种是基 于非差处理方法解算的精确点定位方法——PP法 (Precise Point Positioning),这种方法的优点是直 接收解算观测方程,可直接得到不同方位上每条信 号路径上的未模拟项,其中包含着大气的影响;缺 点是需要精确的接收机和卫星钟信息,易受天线相 位中心变化及轨道误差的影响,而且在解决整周模 糊数上较困难。第二种方法是基于双差处理方法 ——DD法 (Double Difference Processing),以美 国麻省理工学院的GAMIT软件为代表,这种方法 优点是精度高,允许解算整周模糊数,可消除诸如 卫星钟差等的大部分观测误差,但在计算 Si 这一项上较为困难,不同 GPS 观测站点的双差会损失部分无法组差的观测量。Braun 等<sup>[1]</sup>的研究表明,PP 方法的均方根误差(root-mean-square error,简称为 RMS)为 DD 方法的两倍。

## 3 GPS 观测倾斜路径水汽总量的实 验验证

应用 GAMIT 处理软件,我们进行了倾斜路径 方向 SWV 反演工作的实验。为得到高精度的 SWV 数据,有许多问题需要考虑,如轨道误差、多 路径效应等。我们采用 IGS 后处理的精密星历,截 止仰角 15°,过低观测角度的数据易受多路径效应 的影响。计算 SWV 的公式<sup>[13]</sup>如下:

 $S^m_{\mathrm{W}i} = m(\theta^m_i)P_{\mathrm{W}} + S^m_i = m(\theta^m_i)P_{\mathrm{W}} +$ 

 $\Pi[M_{\Delta}(\theta) \cot e(G_{N}^{w}\cos\phi+G_{E}^{w}\sin\phi)+R],$ 其中, $M_{\Delta}(\theta)$ 为梯度映射函数, $G_{N}^{w},G_{E}^{w}$ 分别代表南 北、东西方向湿延迟梯度项, $\phi$ 为卫星方位角,e为 卫星仰角,R代表水汽残差项。大气延迟是精确定 位的主要误差源之一,在GAMIT数据处理当中, 为了模拟出这一项,估算一系列的对流层大气参 数,包括天顶延迟和梯度等项<sup>[14]</sup>。在大气球面分 层且方位对称情况下,采用映射函数可将天顶延迟 映射到卫星方向形成倾斜路径延迟。但偏离方位对 称的大气状况难以用这种分层模式计算,所以还需 要使用梯度的方法来模拟估算。我们采用 Niell 映 射函数<sup>[15]</sup>,Niell发展的映射函数因其表达式中常 数值与测站气象数据无关,且精度很高,因而在 GAMIT等精密 GPS处理软件中广泛使用。

可观测 SWV 的另一种仪器为微波辐射计 (Water Vapor Radiometer,简称 WVR),其借助微 波辐射传输方程观测天空亮温,可以反演出倾斜路 径方向上的水汽总量以及云中液态水总量。我们假 定 WVR 反演结果代表了真实大气状况,可用来确 认 GPS 估算结果。图 1 为二者在不同时间和地点 的对比,图 1a 为 3 月份和 6 月份南京实验结果,此 时大气水汽总量较低,约 15 mm,图 1b 为西安夏 季实验结果,大气水汽总量较高,约 40 mm。我们 试验的大量对比结果表明,二者的 RMS 在 3.8 ~ 4 mm,二者符合较好。二者对比误差也包括了微 波辐射计的探测和反演误差,所以 GPS 反演 SWV 的最终误差低于 3.8 mm。



图 1 2004 年不同观测地点的 GPS SWV 与 WVR SWV 散点图: (a) 3 月 29 日、6 月 9~11 日,观测地点南京; (b) 6 月 26~27 日,观测 地点西安

Fig. 1 Scatterplot of GPS SWV and WVR SWV at different locations in 2004: (a) Nanjing on 29 Mar and from 9 to 11 Jun; (b) Xi'an from 26 to 27 Jun

# 4 暴雨过程中 GPS 倾斜路径水汽总 量的探测

#### 4.1 天气背景

2004年7月10日下午,北京地区发生一次强 暴雨天气。来自西伯利亚的一股冷空气移到华北一 带,与来自低纬度海洋向北推进的较强暖湿气流在 我国西南东部、汉水流域下游到华北中东部相遇, 从而造成一些地区出现大到暴雨。由于大气底层温 度很高,层结很不稳定,北京出现了强雷阵雨天 气。北京地区在2004年7月10日下午发生罕见的 局地大暴雨,降水集中在8~12时(国际协调时 UTC,下同),许多地方每小时降水超过50 mm。 陶祖钰等<sup>[16]</sup>的研究表明,此次降水属于非典型性 的中尺度对流系统(MCS)降水,其云团位置较低 (云顶亮温最低只达-50℃),云团内对流运动强烈 (上升速度达515.7 cm/s)。这次暴雨在历史上罕 见,我们选取这次暴雨过程进行了GPS SWV 观测 水汽分析。

#### 4.2 GPS 天顶方向水汽总量的变化特征

GPS 观测共采用了 6 个站点(站点分布见图 3a),包括北京西南部房山地区的 4 个 GPS 观测站 ——QLHD、HCHD、YSDD、SGZD,1 个 IGS 跟 踪站——BJFS 站,以及海淀区 1 个 SuomiNet 实时 观测站点——SA34 站<sup>[17]</sup>。GPS PW 可认为是测站 至所有可见卫星的 SWV 观测量映射到天顶方向 后,在一段时间内(如 30 min)的平均。典型 PW 估算认为水汽场是水平均匀,观测时间段内保持不 变。为研究 GPS 遥感在这次暴雨过程中的应用, 我们应用第 3 节介绍的方法计算了所有站点的 PW 及每一站点对所有可见卫星的 SWV。

图 2 (文后彩图) 给出了其中部分站点的 PW 时间变化,时间从 7 月 9 日到 7 月 11 日,并给出了 位于北京南郊大气探测基地的自动气象站每小时降 水结果。可以看出,各站水汽变化状况相似——先 增加、后降低。在降水发生前,从 7 月 9 日开始 PW 就持续增加,在 10 日 10 时左右 PW 最高可达 55 mm,一天内水汽增加超过了 20 mm。水汽的持 续增加为暴雨的启动创造了条件;降水约持续 4 个 小时,以 7 月 10 日 09 时最强,达到了约 100 mm。 在降水启动后,总水汽量有一个较短的下降过程。

#### 4.3 倾斜路径水汽总量在天顶方向分量变化特征

GPS 估算 PW 的一些假定在某些情况下并不 正确,如天气系统发生快速变化时,水汽在时空上 有较强的变化。GPS PW 观测实质上是对 SWV 的 时空平均,由于这种平均,水汽的各向异性部分被 消除了,因而一维的 PW 不包含水汽的空间分布信 息。而 SWV 探测可以提供测站上空大气中不同方 位上的水汽含量变化信息。但信号路径上的 SWV 是卫星仰角的函数,卫星仰角不同则信号穿越大气 层路径不同,水汽含量也不相同,难以直接相互比 较。为便于相互比较同一站点对不同卫星的 SWV 观测,或不同站点对同一卫星的 SWV 观测,应该 消除其中的仰角影响。我们用湿映射函数 m<sub>w</sub>(θ)把 SWV 映射到天顶方向,产生的量简称为 VSWV, 计算公式如下:

$$V_{\text{SWV}} = rac{S_{ ext{WV}}}{m_{ ext{w}}( heta)}.$$

由于 VSWV 能消除卫星仰角影响或路径影 响,所以不同方位上的 VSWV 之间的比较或与 PW 的比较可表示水汽空间分布的不均匀性。图 3 和图 4 (文后彩图) 分别给出了 GPS 观测网区域最 强降水发生前后 PW 水平分布和 QLHD 站 PW、 VSWV 时间变化序列,图4中 PRN 及其后两位数 字代表 GPS 卫星编号。由 PW 水平分布可以看出, 以 SGZD 站水汽值最高, 西南方向水汽值相对高于 东北方向,表明水汽由西南往东北方向输送。QL-HD 站位于 SGZD 北部, 其上空在降水时段内可观 测到的卫星示于图 5。由图 4 可见, PRN05 卫星存 在于天空可以被观测的时段内,其估算出的 VSWV 表现出或增或降趋势, 但整体水平高于平 均的 GPS PW,因而这颗卫星的方位上应该存在水 汽量的高值区。由图 5 可以知道, PRN05 卫星位 于 QLHD 站的东北方向, 再结合图 3 中 PW 水平 分布图可以证实 PRN05 卫星 VSWV 的这种变化。 观察图 3 可见, QLHD 站的东北方位上, QLHD 与 SA34 之间的区域为水汽高值区,水汽有增长变化 趋势,可证实 PRN05 卫星 VSWV 的变化状况。 PRN22 卫星方向 VSWV 整体低于 GPS PW, 表现 出下降趋势,结合图 3 也可以证实 VSWV 的这种 变化, PRN22 卫星处于 QLHD 南部方位上, 开始 阶段水汽较高, 但随着暴雨系统的发展, 这个方向 水汽有下降趋势。而 PRN 25 卫星 VSWV 的平均 变化接近于 GPS PW, 围绕 PW 上下波动。上述三 颗卫星方向上 VSWV 之所以表现出上述种种变 化,是由暴雨系统的移动变化和卫星的相对位置所 决定的。由图 4 还可看出所有卫星的 VSWV 的变 化皆围绕 PW,体现出 PW 是所有 VSWV 观测值 时空平均的特点,同时也说明单站上空 PW 并不包 含测站周围水汽空间变化信息。通过以上分析可以



1173

图 3 7月10日GPSPW水平分布:(a)08:15;(b)08:45;(c) 09:15。十字形标志为站点位置

Fig. 3 Horizontal distribution of GPS PW on 10 Jul (the cross symbols represent the positions of GPS sites): (a) 0815 UTC;(b) 0845 UTC; (c) 0915 UTC



图 5 2004 年 7 月 10 日 07:30~10:30 QLHD 站可见 GPS 卫星 天空位置图 (中心点代表天顶)

Fig. 5 Sky plot of GPS satellites viewed at QLHD site from 0730 UTC to 1030 UTC on 10 Jul 2004. The center point represents the zenith

得到,单站 SWV 相对于 PW 而言,能更好地代表 真实大气水汽分布;与暴雨系统及卫星位置相关的 SWV,可用来探测不同空间方位上水汽的变化,不 同方位上的水汽 VSWV 变化量可达 20%。

图 6 (文后彩图) 给出了 7 月 10 日从不同观测 站点观测同一颗卫星时产生的 VSWV 时间序列, 图 6a 为 BJFS、HCHD 和 SA34 三个站点对同一颗 GPS 卫星 PRN30 观测的 VSWV 序列,图 6b 为三 站对 PRN25 卫星观测的 VSWV 序列。由图可见, BJFS 和 HCHD 两站观测到的对每颗卫星的 VSWV 变化情况较为相近, 两站与 SA34 站观测结 果则差异明显,多数情况下,高于 SA34 站 VSWV。再次结合图 3 中 PW 的水平分布变化,可 以看出从不同观测站对同一颗卫星观测到的 VSWV 变化与 PW 的空间分布变化较为一致。 BJFS 与 HCHD 两站处于 PW 值相对较高的区域, SA34 站处于水汽值相对较低区域,所以 BJFS 和 HCHD 两站观测的 VSWV 值高于 SA34 站 VSWV。由于 BJFS 与 HCHD 两站空间上距离更 近,二者对同一颗卫星的观测路径相似,所观测的 大气状况相似, 所以这两站的 VSWV 变化较为一 致;而 SA34 站位于观测网的东北方向,尽管和另 外两站观测的是同一颗卫星,但信号路径差异较 大,反演出的水汽与另外两站差异较大,因而 SA34 站观测到的 VSWV 与另外两站相比,产生了 较大的差异。这种 VSWV 之间的相似性以及差异 性表明,VSWV 可以用来探测暴雨或锋面系统的 发生发展过程中水汽的空间变化。

### 5 结论

GPS PW 观测只代表站点上空大气水汽一维的信息,而不同空间指向的 SWV 则包含了水汽空间分布信息,比 PW 更有价值。本文介绍了 GPS 反演 SWV 的原理和计算 SWV 的方法,实验表明,GPS 与 WVR 相比,RMS 误差在 3 mm 左右,证明GPS 反演 SWV 是可行的。利用区域 GPS 观测网研究了暴雨过程中的水汽总量 PW 的空间分布以及单站倾斜路径水汽总量 SWV 的特征,为消除卫星仰角影响,将 SWV 转换为 VSWV 进行分析。本文得到如下结论:

(1) 同一 GPS 站点对不同卫星观测的 VSWV 对比表明,不同卫星方向的 VSWV 围绕此站 PW 值上下波动, VSWV 值依赖于暴雨系统的发展和 卫星之间的相对位置关系,对应水汽增加方向的 VSWV 亦增加。

(2)不同站点到相同卫星的 VSWV 之间存在 相似性和差异性,相近站点对同一颗卫星的 VSWV 相关性好于空间上远离的站点,PW 分布相 对较高的区域对应有较大的 VSWV 值。

(3) 组网观测的 GPS 站点可利用倾斜路径观测的 SWV 较全面地探测不同空间方位上的水汽变化, PW 是所有 SWV 观测的时空平均, SWV 比 PW 更能代表真实大气水汽分布状况。因而, SWV 可应用于诸多与水汽相联系的大气现象的研究中。

#### 参考文献 (References)

- [1] Braun J, Rocken C, Liljegren J. Comparisons of line-of-sight water vapor observations using the Global Positioning System and a pointing microwave radiometer. J. Atmos. Oceanic Technol., 2003, 20: 606~612
- Flores A, de Arellano J V G, Gradinarsky L P. Tomography of the lower troposphere using a small dense network of GPS receivers. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 2001, 39 (2): 439~447
- $\left[ \begin{array}{c} 3 \end{array} \right] \,$  Duan J, Bevis M. GPS meteorology: direct estimation of the

absolute value of precipitable water. J. Appl. Meteor., 1996, **35**: 830~838

- Li Chengcai, Mao Jietai, Li Jianguo. GPS remote sensing of total water vapor amount. *Chinese Science Bulletin*, 1999, 3: 333~336
- [5] 李成才,毛节泰. 地基 GPS 遥感大气水汽总量中的"静力延迟"和"湿延迟"、大气科学,2004,28 (5):795~800 Li Chengcai, Mao Jietai. The concepts of hydrostatic delay and wet delay in remote sensing water vapor with ground based GPS receivers. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2004, 28 (5): 795~800
- [6] Bevis M, Businger S, Herring T A, et al. GPS meteorology: remote sensing of atmospheric water vapor using the global positioning system. J. Geophys. Res., 1992, 97: 15787~ 15801
- Ware R, Alber C, Rocken C, et al. Sensing integrated water vapor along GPS ray paths. *Geophys. Res. Lett.*, 1997, 24: 417~420
- [8] Alber C, Ware R, Rocken C, et al. Obtaining single path phase delays from GPS double differences. *Geophys. Res. Lett.*, 2000, 27: 2661~2664
- [9] Braun J, Rocken C, Ware R. Validation of line-of-sight water vapor measurements with GPS. Radio Sci., 2001, 36: 459~472
- [10] Seko H, Nakamura H, Shoji Y, et al. The meso-γ scale water vapor distribution associated with a thunderstorm calculated from a dense network of GPS receivers. J. Meteor. Soc. Japan, 2004, 82 (1B): 569~586
- [11] Guo Y R, Kuo Y H, Dudhia J, et al. Four-dimensional variational data assimilation of heterogeneous mesoscale observa-

tions for a strong convective case. Mon. Wea. Rev. , 2000, 128:  $619 \sim 643$ 

- [12] Wolfe D E, Gutman S I. Developing an operational, surface based, GPS, water vapor observing system for NOAA: Network design and results. J. Atmos. Oceanic Technol., 2000, 17: 426~440
- [13] 毕研盟,毛节泰,刘晓阳,等.应用地基 GPS 遥感倾斜路径 方向大气水汽总量.地球物理学报,2006,49(2):335~342
  Bi Y M, Mao J T, Liu X Y. Remote sensing of the amount of water vapor along the slant path using the ground-based GPS. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2006,49(2):335 ~342
- [14] King R W, Bock Y. Documentation for GAMIT GPS processing software, Release 10. 2. Mass. Inst. of Technol., Cambridge, MA, 2005
- [15] Niell A E. Global mapping functions for the atmosphere delay at radio wavelengths. J. Geophys. Res., 1996, 101 (b2): 3227~3246
- [16] 陶祖钰,葛国庆,郑永光,等. 2004年7月北京和上海两次 重大气象事件的异同及其科学问题. 气象学报,2004,62
   (6):882~887

Tao Zuyu, Ge Guoqing, Zheng Yongguang, et al. Similarities and difference between two disastrous weather events occurred in Beijing and Shanghai July 2004 and the aroused scientific problems (primary research report). *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 2004, **62** (6): 882~887

[17] Ware R H, Fulker D W, Stein S A. SuomiNet: a real-time national GPS network for atmospheric research and education. Bulletin of the American Meteorological Society, 2000, 81 (4): 677~694



图 2 2004 年部分站点的 GPS PW 及每小时降水 (RAIN) Fig. 2 GPS PW measured at some of GPS sites and hourly rainfall (RAIN) in 2004



图 4 7月10日 QLHD 站 GPS PW 和不同卫星方向的 VSWV 变化序列图 (PRN 及其后的两位数字代表天空 GPS 卫星编号) Fig. 4 Time series of GPS PW and VSWV at different satellite directions at QLHD site on 10 Jul (PRN and the numbers after it represent the serial number of GPS satellite)



图 6 2004 年 7 月 10 日不同观测站点对同一颗卫星观测的 VSWV 变化序列图: (a) PRN30 方向; (b) PRN25 方向 Fig. 6 Time series of VSWV measured in the same satellite direction from different sites on 10 Jul 2004: (a) PRN30; (b) PRN25