

万蓉, 付志康, 李武阶, 等. 2015. 地基 GPS 斜路径水汽反演技术及资料应用初探. 气象, 41(4): 447-455.

地基 GPS 斜路径水汽反演技术及 资料应用初探^{*}

万 蓉¹ 付志康¹ 李武阶² 陈 波³ 于胜杰¹ 邹 倩⁴

1 中国气象局武汉暴雨研究所, 暴雨监测预警湖北省重点实验室, 武汉 430205

2 武汉中心气象台, 武汉 430074

3 湖北省气象局, 武汉 430074

4 重庆市气象台, 重庆 401147

提 要: 斜路径水汽总量(Slant path Water Vapor, SWV)包含了一定的水汽非各向同性空间分布信息, 是区域地基全球定位系统(Global Positioning System, GPS)网进行三维水汽层析的主要数据源; 测站所得到的 SWV 时间序列, 直观地反映接收机测站周边水汽的不均匀分布和动态变化特征。采用天顶可降水汽总量(Precipitable Water Vapor, PWV)反演技术, 以及湿映射函数构建、大气水平梯度模型构建、残差处理等技术, 建立斜路径水汽总量解算算法。通过同步并址观测的 1141 个样本比较, 在高仰角区间, GPS 与微波辐射计对斜路径方向上水汽总量的观测平均偏差 5.8 mm, 均方差 4.4 mm。在结合雷达、微波辐射计等观测对暴雨个例的综合分析中, SWV 系列时序产品能较好地表现测站周边水汽堆积和降水发生后的水汽减少等细微特征。SWV 作为一种新的观测产品, 为天气分析提供了能反映测站周边水汽的分布状况的新信息, 为强对流天气预警预报和机理分析提供新的研究角度。

关键词: GPS, 斜路径, 水汽总量, 暴雨

中图分类号: P459

文献标志码: A

doi: 10.7519/j.issn.1000-0526.2015.04.007

Slant Path Water Vapor Retrieval with GPS and Application in Rainstorm Analysis

WAN Rong¹ FU Zhikang¹ LI Wujie² CHEN Bo³ YU Shengjie¹ ZOU Qian⁴

1 Hubei Key Laboratory for Heavy Rain Monitoring and Warning Research, Institute of Heavy Rain,
China Meteorological Administration, Wuhan 430205

2 Wuhan Central Meteorological Observatory, Wuhan 430074

3 Hubei Provincial Meteorological Bureau, Wuhan 430074

4 Chongqing Meteorological Observatory, Chongqing 401147

Abstract: Slant path water vapor (SWV) contains the information of the nonisotropic distribution of water vapor in space, and it is the main data source for the 3D water vapor density analysis. The SWV time series obtained by observing stations directly the uneven distribution and changes of water vapor surrounding the station receiver. SWV algorithms is established by using the zenith precipitable total precipitable water vapor (PWV) inversion techniques, the wet mapping function, horizontal gradient function of wet atmospheric and the residual processing technology. By comparing the observations of GPS and microwave radiometer, we find the average deviation of SWV is 5.8 mm, and RMS is 4.4 mm in 50°—90° elevation

* 国家自然科学基金项目(41375041)、国家高技术研究发展计划(863 计划)(2012AA120902)、湖北省科技发展基金项目(2014Y06)和中国气象局修缮购置专项共同资助

2014 年 5 月 22 日收稿; 2014 年 12 月 23 日收修定稿

第一作者: 万蓉, 主要从事 GPS 气象学反演技术研发与资料应用. Email: wanrong1@hotmail.com

range. In comprehensive analysis, the products of SWV time series that are combined with rainstorm observation cases by radar and microwave radiometer can better express the detailed features of the water vapor surrounding the station, such as the accumulation and the reduction of water vapor before and after the precipitation respectively, is which would be new reference information for the warning and forecasting of severe convection weather and related mechanism research.

Key words: global positioning system (GPS), slant path, water vapor, rainstorm

引言

大气水汽是天气系统形成过程中的重要因素,因其变化时空尺度小使得水汽精确定量遥感比较困难。目前地基全球定位系统(global position system, GPS)已经具备探测天顶大气可降水汽总量(precipitable water vapor, PWV)的能力,达到探空观测水平(Duan et al, 1996)。地基 GPS 也可探测卫星信号到地面接收站所经历的实际路径上的水汽总量即斜路径水汽总量(slant path water vapor, SWV),其主要反映实际大气中的水汽的三维非各向同性特征。通常我们使用的 GPS 水汽产品 PWV,是通过与仰角有关的映射函数,将倾斜路径的各类大气延迟变换为等效的天顶延迟,并反演计算得到测站上天顶方向的水汽总量(徐桂荣等, 2009;王继竹等, 2014),而文中要探讨倾斜路径上水汽总量 SWV 由卫星信号传播的倾斜路径上的湿延迟反演得到。

在 SWV 反演技术中,映射函数项、水平梯度项和残差项是影响 SWV 的主要因子。实际信号穿过大气时,倾斜路径仰角越低,路线会越长,而延迟量也会越大(李成才等, 2004),即使是均匀大气,映射函数项也必须考虑;而水汽实际分布通常不均匀,水汽的不均匀分布项由水平梯度项、残差项的计算得到。因此要获取精确的 SWV,映射函数、水平延迟梯度和后处理的残差的选择尤为重要。Ware 等(1997)首先提出利用 GPS 计算斜路径水汽 SWV 的方法,Albert 等(2000)从双差中获得斜路径相位延迟,进一步促进了 SWV 技术,国内曹云昌等(2006)探讨整理了用地基 GPS 测量倾斜路径大气湿延迟的两类方法,单点定位方法适用于如 GIP-SY/OASIS 等使用非差观测量估计参数的软件,双差定位方法适用于如 GAMIT 和 BERNESE 等使用双差观测量来估计位置和大气延迟等参数软件,毕研盟等(2006)基于双差法利用湿梯度、残差联合

计算大气水汽各向异性参量,进一步反演得到 SWV。国内外的对比观测分析显示 GPS 观测 SWV 的精度可达毫米量级(Braun et al, 2001;张京江等, 2009)。

目前 GPS 水汽观测资料广泛用于暴雨过程的分析。地基 GPS 水汽总量数据资料的初值同化明显增强模式初始场湿度,提高模式对该暴雨过程降水时段、落区和强度的预报水平(李红莉等, 2009;楚艳丽等, 2007;张晶等, 2014),特别是对于水汽时间变化快、空间变化尺度较小地区水汽的影响更加敏感(Guo et al, 2000)。GPS 测站上空水汽总量值随时间的变化趋势对暴雨的发生、发展以及过程降水量的分析和预报,水汽的输送等有一定指示意义(楚艳丽等, 2007;张端禹等, 2010),斜路径上的水汽含量 SWV 主要被用于通过层析技术获得水汽的三维结构(毕研盟等, 2006;万蓉等, 2013),在许多天气现象的研究中,SWV 也有很好的应用前景,如能在低空急流水汽输送、深对流发展、锋面过境等天气系统发生显示水汽的快速变化特征(Seko et al, 2004;毛辉等, 2006)。

目前 GPS 气象的湿延迟解算主要是应用 GAMIT 或 BERNESE 等软件,在文中主要基于双差定位原理建立 SWV 解算算法,并利用微波辐射计与 GPS 对斜路径水汽进行同步观测对比试验,以检验分析反演结果。并利用 GPS 台站 SWV 水汽时序资料,结合湖北 GPS 网的 PWV 水汽的二维分布、微波辐射计水汽观测、地面自动站资料和雷达反射率等,综合分析暴雨天气过程中水汽的输送聚集以及在测站周边水汽堆积耗散等特征,以期能将 GPS SWV 应用于暴雨过程的水汽输送、转化等机理研究,为业务预报提供参考。

1 斜路径水汽总量反演技术

在大气各向同性的假设下,斜路径方向上对流层总延迟可以表达为仰角的函数,但是在仰角相同

的情况下,不同方位角的斜路径延迟量往往也不同。实际大气的气压、温度和水汽的水平分布往往不对称,而引起 GPS 信号在大气对流层中的延迟量的各向异性,因而要加入水平梯度模型和残差项来更精确地模拟对流层大气延迟,斜路径上对流层总延迟量(Slant path Total Delay, STD)可表示为:

$$STD = m_h(\theta)ZHD + m_w(\theta)ZWD + D(\theta, \varphi) + R_e \quad (1)$$

式中, $m_h(\theta)$ 、 $m_w(\theta)$ 分别是干、湿映射函数(Niell, 1996)。 $D(\theta, \varphi)$ 为对流层大气延迟水平梯度引起的延迟,称为水平梯度项,其包括干大气延迟梯度 $D_d(\theta, \varphi)$ 和湿大气延迟梯度 $D_w(\theta, \varphi)$,是仰角 θ 、方位角 φ 的函数。 R_e 为解的残差项,即观测值与模拟值的差。残差项的处理采用双差残差到非差残差的转化的方法(曹云昌等,2006;丁金才,2009)。

大气水平梯度引起的不同方位的延迟差异值,可以反映为水梯度项到斜路径上的投影。采用模型如下:

$$D(\theta, \varphi) = m_\Delta(\theta) (G_N \cos\varphi + G_E \sin\varphi) \quad (2)$$

式中, G_N 、 G_E 分别是南北、东西方向梯度分量, $m_\Delta(\theta)$ 是水平梯度映射函数(Albert et al,2000)。

为计算 SWV,需要得到湿大气延迟梯度,即将干大气延迟梯度从大气延迟梯度中分离。干大气延迟梯度主要由气压和温度的水平分布梯度引起的,具有 100 km 左右的空间尺度和几天的时间尺度,而湿大气延迟主要由水汽的水平分布梯度引起的,具有较小的空间尺度(<10 km)和几小时的时间尺度,但在总延迟梯度项中占主要的地位。基于干大气延迟梯度具有较大的时间和空间尺度的特点,采用平均处理,假定在一个较短的时间内(如 12 h)其为一个常数,可以把软件解算出来的各时次的梯度项在一段时间内(如 12 h)的平均值作为干大气延迟梯度,而各个时次的梯度项减去干大气延迟梯度即为湿大气延迟梯度,对流层大气中 GPS 信号的斜路径湿延迟量 SWD 可以表达为:

$$SWD = m_w(\theta)ZWD + [m_\Delta(\theta)(G_N^w \cos\varphi + G_E^w \sin\varphi) + R_e] \quad (3)$$

用 GAMIT 软件解算获取大气水平梯度、仰角、方位角、残差等、结合自动站观测和探空观测,根据 SWV 反演流程(图 1),由式(3)可以计算得到倾斜路径水汽总量 SWV(丁金才,2009):

$$SWV = m_w(\theta)PWV + \Pi \times [m_\Delta(\theta)(G_N^w \cos\varphi + G_E^w \sin\varphi) + R_e] \quad (4)$$

式(4)中 Π 为本地化的湿延迟量与水汽的转换函数(徐桂荣等,2009)。倾斜方向上水汽总量依据斜路径湿延迟计算,斜路径方向的湿延迟的积分,理论上可以分解到水平和垂直方向进行,湿延迟的垂直积分即天顶湿延迟计算中引入了的大气加权平均温度 T_m ,为垂直方向上气压的加权平均温度,湿延迟的水平积分将引入水平气压的加权平均温度,因实际应用中为避免多路径效应,多采用高仰角卫星进行斜路径观测,水平项为小量;通过求导计算,垂直 T_m 的函数对湿延迟量与水汽的转换系数影响为 0.0058,水平 T_m 的影响则更小,由此在有限观测区域内可忽略对水平方向的气压加权平均温度的考虑,采用垂直方向湿延迟与水汽的转换系数,进行斜路径水汽的计算。

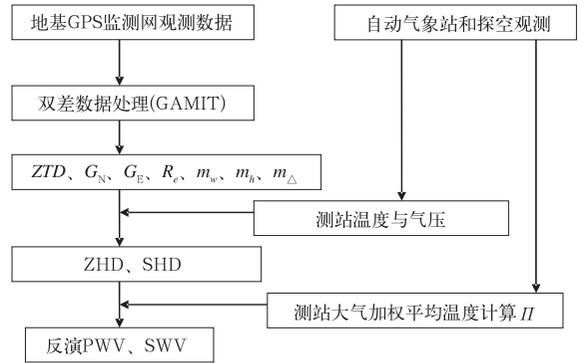


图 1 GPS SWV 的反演流程

Fig. 1 Flowchart of GPS SWV retrieval calculation

2 GPS 与微波辐射计 SWV 水汽对比观测试验与结果

为比较斜路径反演大气水汽总量反演效果,2009 年 8 月在暴雨外场试验咸宁基地进行了 15 天的 GPS/MET 与微波辐射计(WVR)的并址斜路径水汽观测,即将微波辐射计与 GPS 接收站安置于同一地点,并对同一斜路径方向同时观测(图 2)。

因天空各个卫星按各自的轨道运行,因此需及时获取卫星的方位和仰角,来设定微波辐射计探测的方向。为不影响本站的固定 GPS 的数据传输运行,试验中另安装一套 GPS 接收系统,以获取空中 GPS 卫星的具体位置,为 GPS 的实时观测数据建立新的 IP 地址,自动下载实测卫星的位置信息;为保证较长的追踪时间,根据 GPS 观测到的卫星仰角与方位,取仰角较高、方位位于东面的星进行跟踪:即去

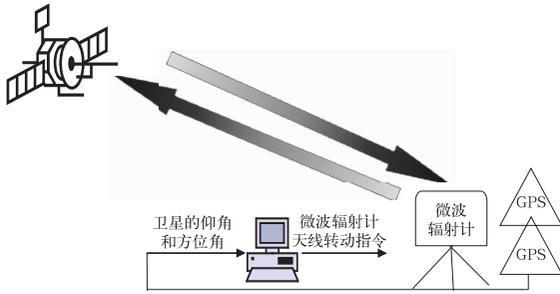


图 2 GPS 与微波辐射计 SWV 水汽对比观测试验

Fig. 2 Schematic diagram of the SWV vapor comparison experiment by GPS and microwave radiometre

掉小于 10° 的仰角的星,然后按卫星偏东方位角排序,取排前 4 颗的卫星位置读入到微波辐射计的观测命令中;微波辐射计将在第一颗星的角度上扫描 10 次,其余的星扫描 3 次,考虑不影响业务观测,最后回到 0° 方位角上开展连续的业务观测 6 次。一个观测周期在 20 min 内完成。每间隔 20 min 启动一次自动观测,通过 windows 下 Scheduled Tasks 添加计划任务来完成。整个卫星筛选,微波辐射计运行指令修改,追踪观测启动终止采用自动控制。以实现对同颗卫星所在角度方位上的水汽同步观测。在对比试验期间,微波辐射计的常规业务每天 00 时 UTC 启动开机,按试验对比观测的启动方式运行。

使用双通道算法获取微波辐射计斜路径方向的水汽总量 WVR SWV(Fredrick, 1993):

$$SWV = c_0 + c_1 \tau(23.8) + c_2 \tau(30) \quad (5)$$

$$\tau(\epsilon) = \ln \left[\frac{T_{mr} - T_{cosmic}}{T_{mr} - T_b(\epsilon)} \right]$$

式中, T_{cosmic} 是宇宙的背景亮温,为 2.7 K; T_{mr} 是与当地季节的大气平均亮温有关的值,这里取为平均地面温度的 95%(刘红燕等,2009), T_b 是地基微波辐射计在 23.8 GHz 或 30.0 GHz 通道测量得到的亮温值; c_0 、 c_1 、 c_2 是区域参数,基于武汉站一年的探空观测统计获得,分别为 -0.00582, 22.94958, -14.97876(Fredrick, 1993)。地基微波辐射计通过接受大气微波辐射信号来测量大气水汽总量。大气中在微波波段起主要吸收作用的气体有氧气和水汽。臭氧及其他大气所含微量气体以及污染成分(如 H_2S 、 SO_2 、 NO 、 CO 等)也有一定的吸收作用,考虑这些气体在大气中的含量相对稀少,而对大气微波的作用非常微薄,故忽略。

基于咸宁站观测微波辐射计和地基 GPS 在

2009 年 8 月 6—21 日对比观测获取的 SWV,选取 GPS 观测方位角和仰角与微波辐射计观测方向偏差控制在 1° 或 5° 范围以内的样本,分别对不同仰角范围 $10^\circ \sim 90^\circ$, $30^\circ \sim 90^\circ$, $50^\circ \sim 90^\circ$ 的 SWV 进行对比分析。

对于微波辐射计和 GPS/MET 观测方向偏差控制 $\leq 5^\circ$, 观测仰角 $10^\circ \sim 90^\circ$ 可用的样本数为 1141。从图 3 上可以看出,在仰角较小情况下,如在 30° 以下时微波辐射计与 GPS/MET 反演的 SWV 差异较大,差别最大达到 107 mm。在 30° 以上时,两者差值逐渐减小并且逐渐稳定。

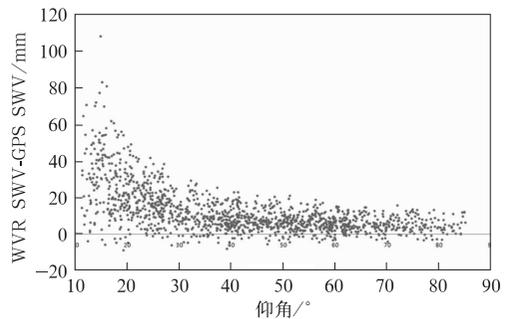


图 3 WVR SWV 与 GPS SWV 差值随仰角的分布(观测方向偏差 $\leq 5^\circ$)

Fig. 3 Distribution of the deviation between WVR SWV and GPS SWV with elevation

对于仰角为 $10^\circ \sim 90^\circ$ 的数据,微波辐射计反演 SWV 与 GPS/MET 反演结果的相关系数为 0.98, 两者的拟合直线的斜率为 1.138, 拟合度 R^2 为 0.964(图 4)。对于不同仰角范围两种观测的 SWV 差异统计值不同(表 1)。

随着观测对比仰角的升高,两者的偏差减小。 $50^\circ \sim 90^\circ$ 高仰角区间的微波辐射计反演的 SWV 与

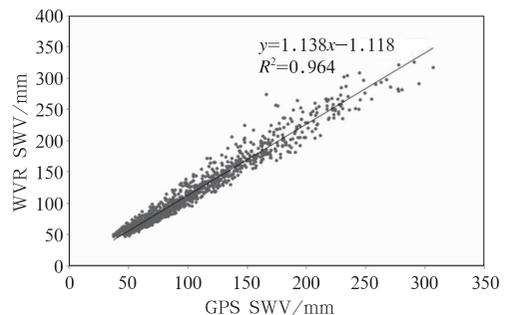


图 4 $10^\circ \sim 90^\circ$ 仰角区间 WVR SWV 与 GPS SWV 对比图

Fig. 4 Comparison between WVR SWV and GPS SWV in the $10^\circ \sim 90^\circ$ elevation range

表 1 不同观测仰角范围微波辐射计反演 SWV 与 GPS/MET 反演结果对比

Table 1 Contrast of microwave radiometer retrieval SWV and GPS/MET retrieved result in different observation elevation ranges

观测仰角范围	相关系数	平均偏差 /mm	偏差标准差 /mm
10°~90°	0.98	12.12	12.47
30°~90°	0.94	7.03	5.55
50°~90°	0.94	5.8	4.4

GPS/MET 反演的 SWV 对比, 偏差的平均值为 5.8 mm, 偏差的标准差为 4.4 mm。

为了进一步研究两种观测设备观测路径的偏差对对比分析试验的影响, 将两者对应的仰角和方位角偏差严格控制在 1° 范围内, 10°~90° 仰角范围内样本 1009 个。10°~90° 仰角范围内两种观测相关系数为 0.981, 偏差的平均值为 12.21 mm, 偏差的标准差为 12.65 mm。偏差的标准差略有降低。说明两种观测设备观测路径的偏差在 5° 范围内对对比分析试验没有太大影响。

3 SWV 产品在暴雨天气过程综合观测分析中的应用

基于斜路径大气可降水量 SWV 解算原理,

SWV 产品描述了某个测站周边水汽分布的特性, 能表征测站周边水汽的各向异性。两种 SWV 时序产品绝对 VSWV 和相对 VSWV, 分别提供测站的各个方位角上的垂直水汽分量和分量距平值随时间的变化。绝对 VSWV 表示不同方位上 SWV 在天顶方向的垂直分量, 该分量的变化代表测站周围水汽变化在垂直方向的投影。相对 VSWV 是利用绝对 VSWV 减去天顶水汽总量(所有绝对 VSWV 的平均值), 表示测站周围水汽垂直分量的距平值(毛辉等, 2006)。绝对 VSWV 和相对 VSWV 表达式如下:

$$\text{绝对 VSWV} = \text{SWV} / m_{wv}(\theta)$$

$$\text{相对 VSWV} = \text{绝对 VSWV} - \text{PWV}$$

产品时间序列图横坐标为时间(世界时), 纵坐标为方位角, 以正北为 0°, 正东为 90°。

利用环流形势背景场、雷达、地面自动站和 GPS PWV 等反映中尺度以上的综合观测资料, 并结合 GPS SWV 和微波辐射计等小尺度观测信息, 从不同尺度和角度对暴雨的形成发展特征进行综合分析。2011 年 6 月 9 日 00 时至 10 日 00 时, 受中低层切变线和西南急流的共同影响, 在鄂东南咸宁地区发生了大暴雨, 通城出现了 256.1 mm 的特大暴雨, 其他测站 24 h 降水 > 75 mm (图 5), 降水主要集中在 9 日 15—23 时。

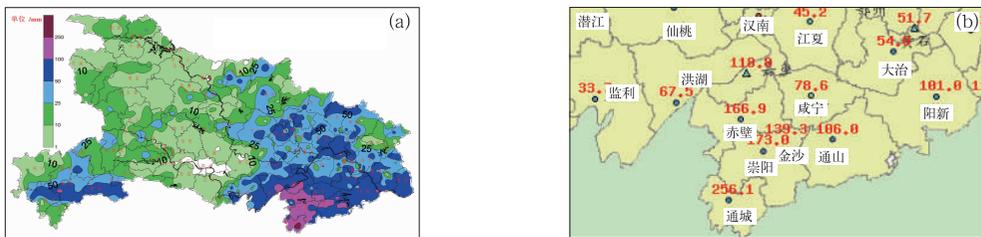


图 5 湖北省 2011 年 6 月 9 日 00 时至 10 日 00 时(UTC)的雨量实况(a)和强降水中心示意图(b)

Fig. 5 Observed rainfall amount (a) and severe precipitation center (b) in Hubei from 00:00 UTC 9 to 00:00 UTC 10 June 2011

此次降水主要是高空低槽东移与西太平洋副热带高压的稳定维持(500 hPa 环流形势场略), 有利于副热带高压外围西南气流发展加强, 形成湖北中东部带来充沛水汽的大尺度环境, 有利于雨带稳定维持。湖北东部位于 200 hPa 急流右侧的气流散开区和 850 hPa 暖切变南侧、低空急流左前方的辐合区, 形成了有利强降水发生的高空辐散、低空辐合

的动力配置(925 hPa 水汽通量散度中心强度为 $-8 \times 10^{-8} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)。9 日 20 时, 随着切变线东移南压, 低空急流随之东移并发展加强, 将湖南东北部大量水汽输送到鄂东南地区(图 6), 导致湖北省东部咸宁地区降水发展加强。

雷达回波和地基 GPS 网的 PWV 大气水汽综合观测显示对流系统演变和水汽输送变化的中尺度

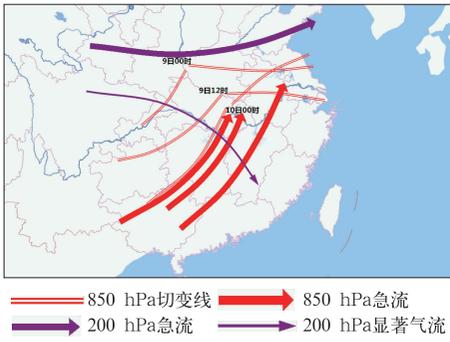


图6 2011年6月9日00时至10日00时850 hPa切变线、急流和200 hPa急流动态图

Fig. 6 Dynamic map of 850 hPa shear line and jet stream and 200 hPa jet stream from 00:00 UTC 9 to 00:00 UTC 10 June 2011

特征。9日12时在湖北省鄂东地区有带状对流云

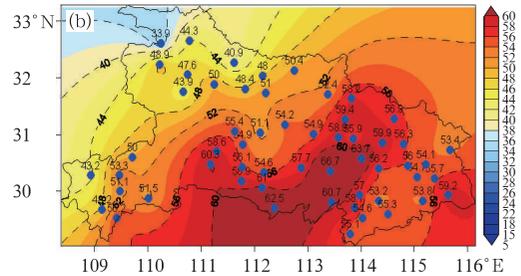
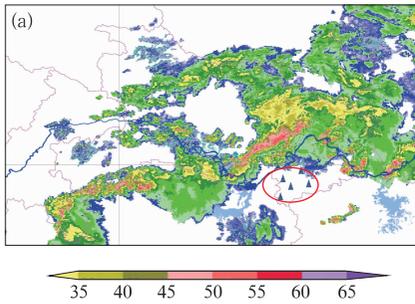


图7 2011年6月9日12时雷达回波强度(a, 单位:dBz)与PWV(b, 单位:mm)分布图

Fig. 7 Radar reflectivity (a, unit: dBz) and GPS PWV distribution (b, unit: mm)

at 12:00 UTC 9 June 2011

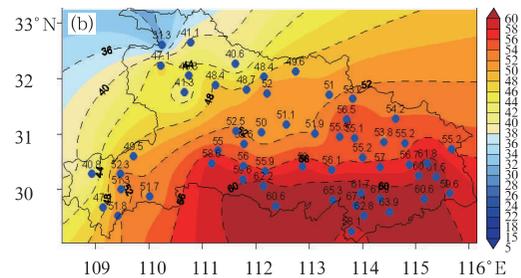
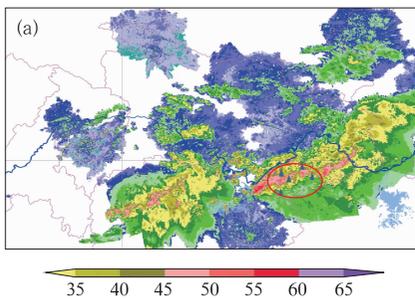


图8 同图7,但为16时

Fig. 8 Same as Fig. 7, but for 16:00 UTC 9 June 2011

GPS的SWV产品和微波辐射计大气水汽和温度观测,反映站点上空和周边的水汽变化。咸宁站微波辐射计和GPS SWV给出了测站上空强降水过境时的四个阶段的水汽、相对湿度和温度廓线分布状况(图9)。9日00—06时,2 km以下相对湿度显著增强,达到80%以上,水汽密度维持在 $10 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ 以上,水汽的聚集以低层为主,此时段咸宁四周的水

团发展并不断南压,回波带逐渐演变成东北—西南向,开始具有飑线回波的特征,在对流云带上的站点逐小时降水大于30 mm, PWV水汽强中心带向东北延伸(图7),9日16时,回波带断裂后的西段回波,位于湖南岳阳至湖北咸宁一带,回波持续增强到55 dBz以上,并向东南方向移动,对流云团继续发展并移至鄂东南地区,同时在湖南中北部有对流云团发展东移,9日16时前后PWV水汽强中心区域覆盖整个鄂南地区(图8)。充沛的水汽条件和两块对流云团汇合与进一步发展,影响湖北省咸宁地区,造成咸宁通城地区的特大暴雨。在此期间PWV强中心区域一直维持在鄂东南强降水落区。在该地区,降水从北到南,从西往东推进,咸宁、赤壁、崇阳、通城和通山站降水依次增强。

汽(绝对 VSWV)达到49~56 mm,且大值区域在 190° 方位角即测站南部(图10)。06—10时有弱的降水,2 km以上相对湿度较前期减小10%~20%,咸宁四周的水汽(绝对 VSWV)普遍减弱,尤其在 120° 方位即测站东南部减弱2 mm,10—13时,测站周边的水汽再次增长,水汽在测站西北面堆积(方位角 330°),结合前时段水汽的分布和大尺度背景,可

以推断在咸宁站水汽从南到西北方向输送,并随着系统的南压在测站西北面堆积。这些低层水汽的输送和堆积特征,从雷达图不能得到(图 7)。

9 日 13—16 时强降水发生前后水汽密度一直维持在 $20 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ 以上的大值区,7 km 以下相对湿度达到 80% 以上,降水所引起的潜热释放,使得逐层温度明显升高,有利于低层的减压,进而有利于维持中低层的辐合上升,为降水的强度和持续时间提供有利条件,SWV 产品显示该时段及降水发生后,不同方位水汽强度减弱,此时雷达强回波带越过咸宁站南压,绝对 VSWV 值依次在测站西北边($240^\circ \sim 360^\circ$)和南边(180°)出现水汽低值缺口,与微波辐射计同时期观测的水汽密度和相对湿度(图 9)比较可以认为,2 km 以下饱和水汽转变为降水粒子形成降水,并在天气系统的推动下南移,水汽干区缺口较好地反映了水汽转化为降水的特征。

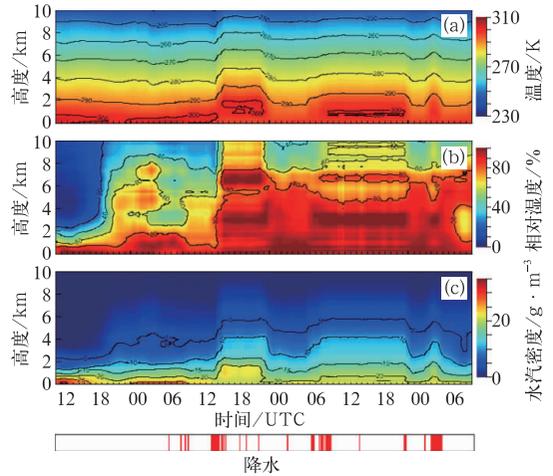


图 9 2011 年 6 月 8—10 日咸宁微波辐射计大气温度(a)、相对湿度(b)、水汽密度(c)演变
Fig. 9 Temperature (a), relative humidity (b) and vapor density (c) by microwave radiometer over Xianning Meteorological Site during 8—10 June 2011

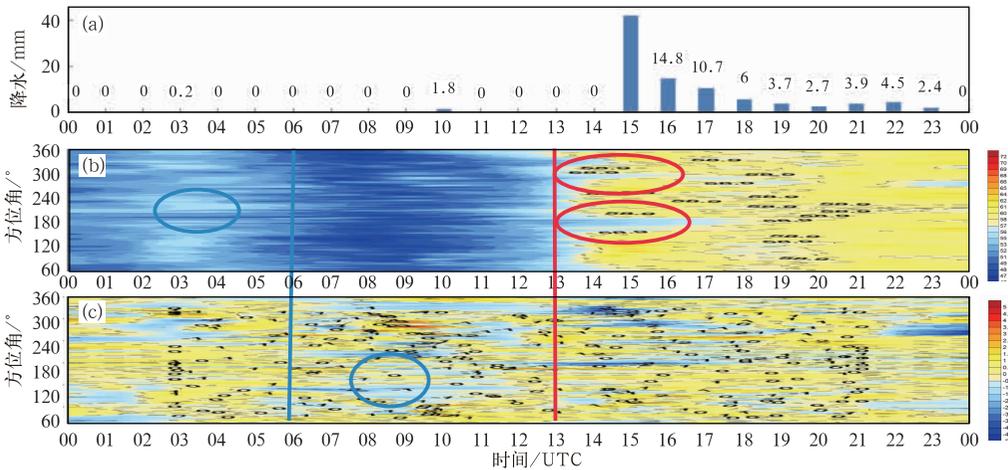


图 10 2011 年 6 月 9 日 00—10 时咸宁逐小时降水(a, 单位: $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$)、绝对 VSWV (b, 单位: mm)和相对 VSWV (c, 单位: mm)
Fig. 10 Precipitation (a, unit: $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$), absolute VSWV (b, unit: mm), relative VSWV (c, unit: mm) at Xianning during 9—10 June 2011

随着切变线南压东移,低空急流随之东移并发展加强,将湖南东北部大量水汽输送到鄂东南地区。其中赤壁站 9 日 16 时逐小时降水达到最大。降水前水汽在赤壁测站周边有快速增加(图 11),09—11 时段水汽在赤壁测站东南边快速堆积,绝对 VSWV 最大值区所在方位为 170° 。11—14 时段随着系统南压,测站周边水汽普遍增长,唯独在 170° 方位上绝对 VSWV 降低 5 mm,相对 VSWV 显示该方位水汽少于平均态,出现水汽低值区,类似于咸宁的观测,该现象与开始降水密切相关。

崇阳位于赤壁以南方向,降水较赤壁晚 1 h,从绝对 VSWV 时序图上看,02—12 时测站周边水汽

增大之前,在测站的 $180^\circ \sim 240^\circ$ 方位水汽含量较其他方位的大,降水前水汽的主要来源是西南偏南方向且连续增长,可见沿副高外围西南气流补充,西南水汽输送一直维持。在降水发生前 13—15 时,测站 180° 方位上即南部出现水汽低值缺口区域,此后伴随强的水汽增加,推断降水初期水汽与降水粒子的转换短时间形成水汽缺口,随着大尺度系统的水汽输送和补充,测站周边的水汽整体增加(图略)。

降水中心通城站降水量居于五站之首,从相对 VSWV 看水汽来源于西部,11—12 时 270° 方向上水汽增长最强(图 12),降水前 3 h 通城台站西北方向水汽增强较快,水汽大值区主要位于测站西部

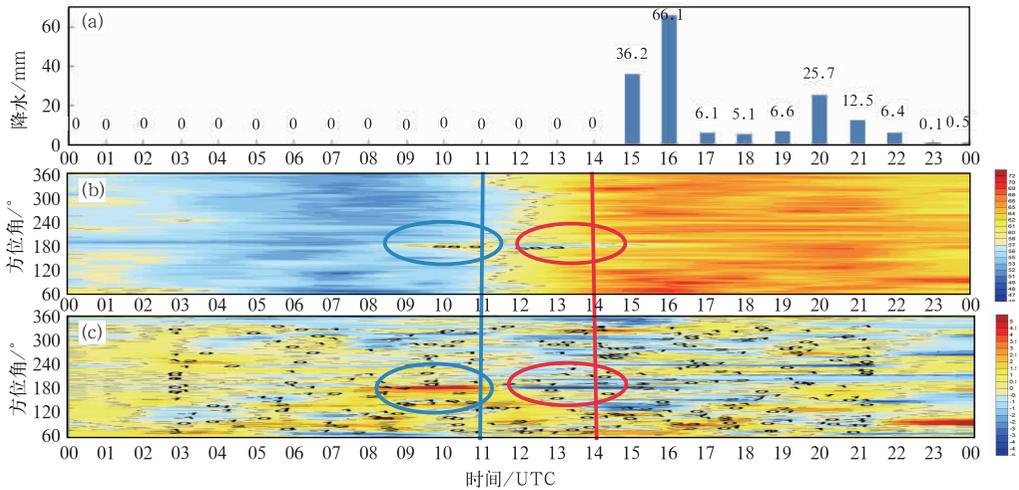


图 11 同图 10, 但为赤壁

Fig. 11 Same as Fig. 10, but for Chibi

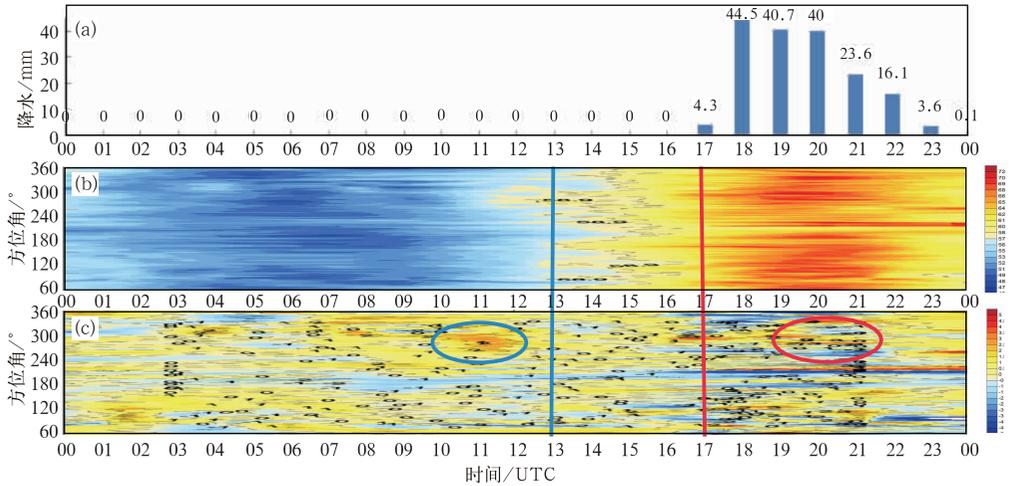


图 12 同图 10, 但为通城

Fig. 12 Same as Fig. 10, but for Tongcheng

($180^{\circ} \sim 300^{\circ}$); 通城逐小时雨强连续 4 h 超过 20 mm, 强降水集中时段, 测站西边水汽量大, 但水汽负距平值区域出现频繁, 与系统中水汽与降水转换有关。

通山位于强降水中心的东部, 降水开始较晚于其他站。降水开始前 9 日 00—05 时, 水汽大值区位于测站北面, 同时在南面 180° 方位有持续的水汽大值区存在。类似于咸宁测站, 在降水开始前测站南测出现水汽低值区, 降水过程中测站东部水汽负距平值区域出现较为频繁, 可能与系统中水汽与降水转换有关(图略)。

通过五站的 SWV 监测资料分析, 比较突出的特点是: 降水强的测站水汽强度普遍高; 站点周边水汽增长, 与中尺度天气系统有关。这次过程水汽的

输送以西南低空急流为主, 测站西侧或南侧水汽有堆积, 增加较快, 随着切变线南压影响, 测站水汽输送路径与 NCEP 中尺度分析中 925 hPa 水汽通量散度负值中心, 700 和 850 hPa 强的西南低空急流一致。有飑线过境时, 测站周边水汽变化有差异。强降水与绝对 VSWV 低值缺口和相对 VSWV 的负值有较好的对应关系, 通过咸宁站与微波辐射计的观测比较, 这些水汽的低值区的出现与水汽向降水粒子的转化有关。

4 结论与讨论

基于 Niell 映射函数、水平梯度项和残差处理等算法, 实现了 SWV 解算。采用 GPS 信号文件的

读取和自动改写微波辐射计观测控制文件和定时启动观测,实现微波辐射计对GPS卫星的自动跟踪观测,相对于手动对比跟踪观测效率有提高,增强了对比路径的一致性,增加了有效样本数。GPS SWV结果与微波辐射计探测的倾斜路径上的水汽总量进行比较,精度达到毫米级。 $50^{\circ}\sim 90^{\circ}$ 仰角区间的两种观测的平均偏差为5.8 mm,标准差为4.4 mm。

天气系统过境时,降水中心各站的SWV不同程度地反映出测站周边的水汽分布情况与变化。各时刻绝对VSWV和相对VSWV能细致反映测站周边水汽随方位角分布,刻画了强降水过境前后的特点:(1)以西南低空急流为主的水汽的输送,随着切变线南压影响,在测站西部或南部有水汽堆积,增加较快;(2)强降水发生时的测站周边水汽强度普遍增高,与中尺度天气系统中水汽输送有关;(3)强降水与绝对VSWV低值缺口和相对VSWV的负值有较好的对应关系,通过咸宁站的GPS与微波辐射计的观测比较,这些水汽的低值区的出现与水汽向液态水的转化有关。GPS SWV作为一种新的观测产品,为天气分析提供了能反映测站周边水汽的分布状况的新信息,为强对流天气预警预报和机理分析提供新的研究角度,具有一定的参考意义。

单站的SWV反映的水汽分布状况,大体符合PWV二维分布趋势,但也可能因局地对流、地形等原因,或水汽的高低层分布不均(如水汽主要在近地层,当倾斜路径的仰角稍高时,远处的水汽因不在射线路径上不能反映)等因素,出现一些局地特征,有待做更细致的观测分析。此外,在SWV反演技术中,不同的映射函数对SWD有较大的影响从而影响SWV的解算,目前国际上提出的映射函数有NMF(Niell Mapping Functions)、全球映射函数GMF(Global Mapping Functions)和动态映射函数VMF1(Vienna Mapping Functions)等多种,如何合理地选择或建立动态映射函数提高解算精度,有待做进一步研究。

致谢:感谢中国气象局气象探测中心曹云昌研究员在斜路径算法上给予的指导与帮助,感谢中国气象局北京城市研究所张京江高工、刘红燕博士、楚艳丽博士在微波辐射计与GPS同步观测方面给予的技术支持与帮助。

参考文献

毕研盟,毛节泰,刘晓阳,等.2006.应用地基GPS遥感倾斜路径方向大气水汽含量.地球物理学报,49(2):335-342.

- 曹云昌,陈永奇,李炳华,等.2006.利用地基GPS测量大气水汽廓线的方法.气象科技,34(3):241-245.
- 楚艳丽,郭英华,张朝林,等.2007.地基GPS水汽资料在北京“7·10”暴雨过程研究中的应用.气象,33(12):16-22.
- 丁金才.2009.GPS气象学及其应用.北京:气象出版社,152-153.
- 李成才,毛节泰.2004.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,28(5):795-800.
- 李红莉,万蓉,谢有才.2009.利用LAPS系统同化地基GPS水汽资料的应用研究.热带气象学报,26(6):702-709.
- 刘红燕,王迎春,王京丽,等.2009.由地基微波辐射计测量得到的北京地区水汽特性的初步分析.大气科学,33(2):388-398.
- 毛辉,毛节泰,毕研盟,等.2006.遥感GPS倾斜路径信号构筑水汽时空分布图.中国科学地球科学,36(12):1177-118.
- 万蓉,郑国光,于胜杰,等.2013.基于观测约束的地基GPS三维水汽层析技术研究.气象学报,71(2):318-331.
- 王继竹,郭英莲,徐桂荣,等.2014.湖北省不同资料反演大气可降水量的误差分析.气象,40(11):1308-1315.
- 徐桂荣,万蓉,李武阶,等.2009.地基GPS反演大气可降水量方法的改进.暴雨灾害,28(3):203-209.
- 张京江,楚艳丽,刘红燕,等.2009.地基GPS和微波辐射计倾斜路径水汽对比观测试验方案设计.气象科技,37(2):239-242.
- 张端禹,王明欢,陈波.2010.2008年8月末湖北连续大暴雨的水汽输送特征.气象,36(2):48-53.
- 张晶,顾松山,楚志刚,等.2014.LAPS同化GPS/PWV资料在暴雨预报中的应用研究.气象,40(1):76-85.
- Albert C, Ware R, Rocken C et al. 2000. Obtaining single phase delay from GPS double differences. Geophys Res Lett, 27(4):2661-2664.
- Bar Sever Y E, Kroger P M. 1998. Estimating horizontal gradients of tropospheric path delay with a single GPS receiver. Geophys Res, 103(6):5019-5035.
- Braun J, Rocken C, Ware R. 2001. Validation of line of sight water vapor measurements with GPS. Radio Sci, 36(2):459-472.
- Duan J, Bevis M, Fang Peng. 1996. GPS meteorology: Direct estimation of the absolute value of precipitable water. J Appl Meteorol, 35(3):830-838.
- Fredrick S S. 1993. Use of pointed water vapor radiometer observations to improve vertical GPS surveying accuracy. Colorado University PhD. thesis:38-39.
- Guo Y R, Kuo Y H, Dudhia J, et al. 2000. Four-dimensional variational data assimilation of heterogeneous mesoscale observations for a strong convective case. Mon Wea Rev, 128(3):619-643.
- Niell A E. 1996. Global mapping functions for the atmosphere delay at radio wavelengths. J Geophys Res, 100(4):3227-3246.
- Seko H, Nakartmura H, Shoji Y, et al. 2004. The meso- γ scale water vapor distribution associated with a thunderstorm calculated from a dense network of GPS receivers. J Meteor Soc Japan, 82(1):569-586.
- Ware R H, Alber C, Rocken C, et al. 1997. Sensing integrated water vapor along GPS ray paths. Geophys Res Lett, 24(4):417-420.