

成都地基的 GPS 水汽监测系统建设与应用

王 皓¹, 李国平¹

(1. 南京信息工程大学大气物理学院, 南京 210044;

2. 成都信息工程学院大气科学学院和高原大气与环境四川省重点实验室, 成都 610225)

摘要: 水汽尽管在大气中的含量很少,但是其在大气中的变化却十分剧烈。其空间分布极不均匀,时间变化也极其迅速。它不仅是天气、气候变化的主要驱动力,也是灾害性天气形成和演变中的重要因子。鉴于水汽信息在数值模式、气候监测、人工影响天气、空中水资源开发等一系列业务领域中的重要性,建立局地或者区域的 GPS 监测系统已成为目前迫切需要解决的问题。GPS 水汽监测系统由数据服务器、解算服务器及应用服务器 3 部分组成。首先,其通过数据服务器接收来自 GPS 卫星所发射的信号,生成相应解算软件所能识别的 RENEX 格式文件,以及获取自动气象站所测得的温、压、湿等相关气象数据,并将得到的数据保存并传送出去;然后,编写相关解算程序使得解算服务器能定时解算大气延迟量,进而反演出可降水量 PWV;最后,利用应用服务器完成与气象应用相关产品的生成和服务任务,从而实现该系统的一体化功能。该系统能定制半小时一次的解算任务,能较准确反映该时段该区域水汽快速变化的特性。建设该系统的最终目的是希望它能填补 GPS 反演水汽技术在四川乃至西南地区应用的空白,增强气象部门对中小尺度灾害性天气的预报监测能力,并促进许多与之相关的气象业务化工作的开展。

关键词: 水汽;GPS;可降水量;监测系统

DOI: 10.3724/SP.J.1047.2011.00213

1 引言

水汽在天气、气候变化中扮演着十分重要的角色。如何测定大气中的水汽含量,监测大气中水汽的分布状况及变化趋势,并有效地应用于实际业务预报,特别是中小尺度灾害性天气的监测预报,对于气象业务部门来说具有重要意义。但是,由于当前水汽探测手段中存在着诸多局限:微波辐射仪设备费用较昂贵;无线电探空仪空间分辨率较差;在有浓云的情况下,星载辐射计和卫星红外辐射计会受到一定限制;激光雷达不能全天候观测。这些原因导致了高精度、高分辨率的水汽监测迟迟难以实现业务化。

在卫星大地测量中,水汽是 GPS 卫星定位中影响精度的主要因素之一。因此,人们从消除测量学噪声的研究过程中,逐渐发展出了一门新型学科—GPS 气象学,简称 GPS/MET。人们利用地基 GPS 技术,通过地基 GPS 监测系统,可有效地弥补传统

探测技术在时间和空间上的不足,提供高时空分辨率、高精度、高容量及快速变化的水汽信息。

从 1994 年美国 NOAA 预报系统实验室(NOAA/FSL)建成的第一个用于遥感水汽的地基 GPS 监测网开始,国内外相关领域的专家学者相继在各国建立了 GPS 监测系统:日本地理测量院(GSI)从 1994 年开始在全国范围布设 GPS 监测系统,现已有测站约 1200 个;1999 年开始,欧洲 15 个国家开展了地基 GPS 永久跟踪站网建设的合作项目,并将解算数据用于数值天气预报的应用与研究^[1];2000 年,由上海天文台、上海市测绘院和上海市气象局共同建设了我国首个 GPS 气象综合应用网,该网由分布在长江三角洲地区的 14 个基准站组成,可以全天候监测大气中水汽变化,为监测短临灾害性天气提供了充足的水汽资料^[2];2002—2005 年,北京市气象局在房山和怀柔两个降水中心区域,建立了 GPS 综合监测系统,以研究局地中尺度水汽的连续变化特征,以及在数值预报上的应用^[3]。鉴于水汽

收稿日期: 2010-09-28; **修回日期:** 2011-02-28.

基金项目: 中国气象局气象关键技术集成与应用项目(CMAGJ2011M46);中国气象局成都区域气象中心区域重大科研业务项目(2010-3,2010-5);成都信息工程学院科研基金项目(KYTZ201034)资助。

作者简介: 王皓(1984-),男,四川成都人,博士研究生,主要从事 GPS 气象学研究。Email: wanghao911@163.com

信息在数值模式、气候监测、人工影响天气、空中水资源开发等一系列业务领域中的重要性,建立局地或者区域的 GPS 监测系统已成为目前迫切需要解决的问题。本文主要内容即是开展 GPS 水汽监测系统的建设,目的是使该系统能填补 GPS 反演水汽技术在四川乃至西南地区应用的空白,增强气象部门对中小尺度灾害性天气的监测预报能力,促进许多与之相关的气象业务化工作的开展。

2 地基的 GPS 探测水汽原理

GPS 卫星发射的无线电波在穿越大气层时,会受到电离层和对流层的折射影响,从而造成无线电信号的延迟。大气的延迟可分为电离层延迟和对流层延迟,由于电离层延迟与信号频率平方成反比,故可通过双频技术得到消除,误差精度能控制在 mm 级。而对流层延迟,即天顶总延迟(ZTD, Zenith Total Delay)由静力延迟(ZHD, Zenith Hydrostatic Delay)和湿延迟(ZWD, Zenith Wet Delay)构成,即: $ZTD = ZHD + ZWD$ 。ZTD 一般通过 GPS 数据处理软件根据 GPS 接收机接收到的原始观测数据解算得出,而可由相关模型得到,如采用 Saastamoinen^[4] 模型(SA 模型): $ZHD = 10^{-7} \frac{k_1 R p_s}{g_m M_d}$,其中, p_s 为地面气压, R 为理想气体普适常数, M_d 为干空气摩尔质量, g_m 为垂直大气柱质量中心的引力加速度,即可通过相应的地面气压值估算出 ZHD,若地面气压精度为 0.5hPa,则 ZHD 的估算精度可达到 mm 级^[5]。ZTD 减去 ZHD 后得到湿延迟 ZWD,再通过 ZWD 与 PWV 之间的转换关系式^[6]: $ZWD = \Pi \cdot PWV$,则可得到大气可降水量 PWV(precipitable water vapor)。其中, Π 为无量纲水汽转换系数, $\Pi = \frac{10^6}{\rho_w R_v [(k_3/T_m) + k_2]}$,式中, ρ_w 为液态水密度, $k_2' = k_2 - k_1 \frac{R_d}{\rho_w}$, k_1, k_2, k_3 为实验常数(本文分别取 77.6k/hPa^[7], 71.98k/hPa^[8], 3.752 $\times 10^5$ k²/hPa^[8]), T_m 为对流层大气加权平均温度,可由 Bevis(1994)提出的利用地面气温得出的经验公式: $T_m = 70.2 + 0.72T_s$ ^[7] 得到,也可根据当地多年探空资料建立 T_m 的本地化修正方案^[9],以提高可降水量反演的精度。图 1 即为 GPS 延迟量反演水汽原理。

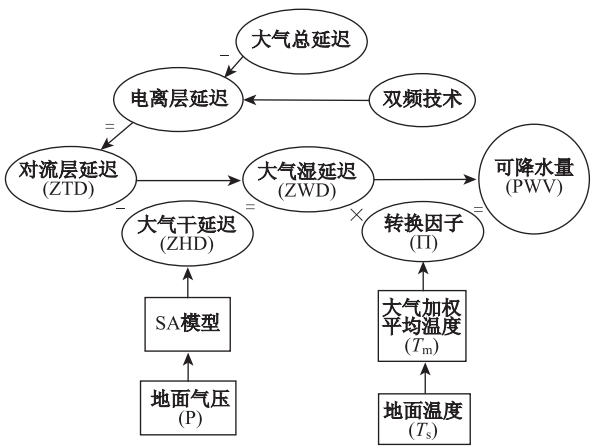


图 1 GPS 水汽的反演原理

Fig. 1 The inversing principle of GPS water vapor

3 地基的 GPS 探测水汽业务化运行系统的构建

3.1 GPS 水汽监测系统的构成

截至 2008 年 6 月,我国已有 16 省(区,市)建立了区域 GPS 水汽监测系统^[10]。目前,全国已建成或计划兴建的 GPS/MET 站将超过 1000 个。成都地区地处青藏高原东侧的四川盆地中,地形影响十分显著。水汽、对流活动、降水的变化特征独特^[11],对于 GPS 水汽监测网的建设已迫在眉睫。本文以成都信息工程学院 GPS 观测站为例,简要介绍地基 GPS 水汽监测系统的基本构建。

如图 2 所示, GPS 水汽监测系统主要由接收机部分和服务器部分组成。由于水汽的反演过程中需要利用相关的气象数据,故还需配置观测地面气象资料的自动气象站^[10]。

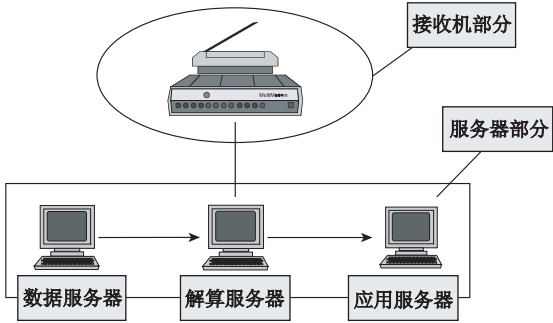


图 2 GPS 水汽监测系统结构

Fig. 2 Components of GPS water vapor monitoring system

GPS 水汽监测系统的服务器部分由数据服务器、解算服务器与应用服务器 3 部分组成。数据服

务器的任务是接收来自 GPS 卫星所发射的信号生成相应的解算软件所能识别的 RENEX 格式文件,以及自动气象站所测得的温、压、湿等相关气象数据,并将得到的数据保存和传送出去。解算服务器主要承担延迟量解算与可降水量 PWV 的反演^[12-14],应用服务器完成与气象应用相关产品的生成和服务任务。图 3 为成都信息工程学院 GPS 外场接收天线。



图 3 成都信息工程学院 GPS 外场接收天线
Fig. 3 GPS receiving antenna in Chengdu University of Information Technology

3.2 GPS 水汽监测系统数据处理的流程

GPS 水汽监测系统的运行可分为 3 个阶段。其中,第一阶段称为 GPS 数据处理阶段,即利用 GPS 接收机获得的 GPS 原始观测数据通过 GPS 数据处理软件进行解算,得到天顶总延迟 ZTD 的值;第二阶段为水汽的反演阶段,即通过天顶总延迟 ZTD 的值利用相关关系式反演出可降水量 PWV 的值;第三阶段为水汽产品可视化及业务应用阶段。

整个数据处理流程如图 4 所示,具体步骤如下:

(1)在数据服务器上编写了隔时段自动提取自动气象站数据的程序,并与相应时间接收到的卫星观测值文件一起打包上传至解算服务器作相应的解算处理;

(2)在解算服务器上,使用解算精度高(解算长基线的相对精度可达到量级),并有开放源代码的 GAMIT 10.35 软件^[15]。本研究根据数据解算步骤编写了相应的自动处理程序,按时解算从数据服务

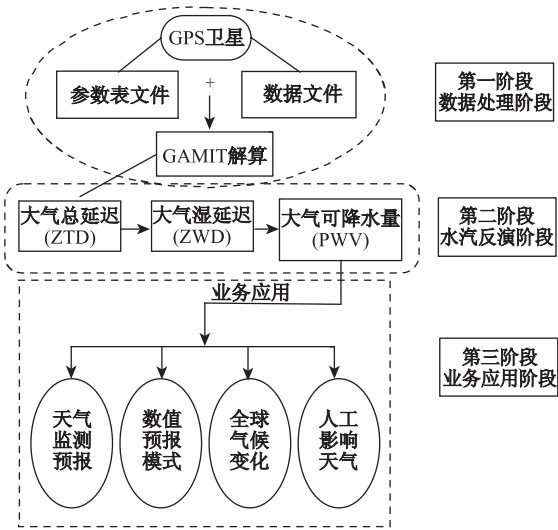


图 4 GPS 水汽监测系统数据处理流程
Fig. 4 Data processing circle of GPS water vapor monitoring system

器上传的相关数据,并利用气象数据进行可降水量(PWV)的反演,反演完毕上传至预先设置好的水汽数据文件夹。同时,综合考虑该站的位置特点,以及对联合解算时的站点远近要求,我们加入了 bjfs、kunm、lhas、wuhn、guao 等 5 个 IGS 站的 GPS 数据进行了联合解算,以 2010 年 3 月 30 日成都信息工程学院站 GPS 水汽监测系统的数据为例,解算得到了这次反演过程的最终结果(见表 1)。

鉴于篇幅所限,本文只列出 2 小时一次的部分解算结果,对于天气分析预报来说,计算可降水量一般选用半小时甚至更短的时间间隔,这样更能反映水汽快速变化的特性,以满足中小尺度灾害天气短临预报的需要及改进数值天气预报的水平^[16]。

(3)利用 MATLAB 强大的绘图功能编写结构简单,性能可靠,易于操作的可视化界面,并通过应用服务器调用显示水汽产品文件。图 5 即为 MATLAB_GUI 技术开发的可视化界面。

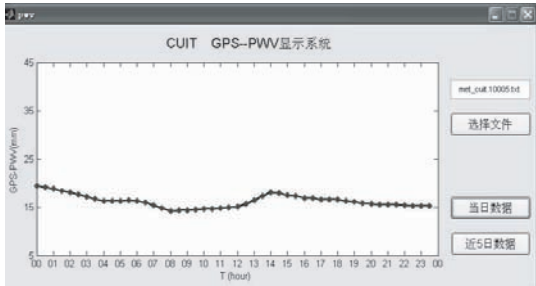


图 5 GPS-PWV 显示系统
Fig. 5 Display system of GPS-PWV

表 1 2010 年 3 月 30 日 2 小时间隔的 GPS 数据解算结果(部分)
Tab. 1 GPS calculating results at 2-hour intervals on March 30, 2010 (part)

年 Yr	日序 Doy	时 Hr	分 Mn	秒 Sec	总延迟 ZTD (mm)	静力延迟 ZHD (mm)	湿延迟 ZWD (mm)	可降水量 PWV (mm)	地面气压 PRESS (hPa)	地面气温 TEMP (K)
2010	89	0	0	0	2294.20	2191.24	102.96	16.55	960.60	288.96
2010	89	2	0	0	2278.10	2190.78	87.32	13.99	960.40	287.86
2010	89	4	0	0	2274.10	2187.59	86.51	13.84	959.00	287.16
2010	89	6	0	0	2266.60	2187.36	79.24	12.67	958.90	286.86
2010	89	8	0	0	2248.30	2188.73	59.57	9.52	959.50	286.76
2010	89	10	0	0	2246.20	2190.55	55.65	8.92	960.30	287.86

4 GPS 水汽监测系统的实例应用验证

为了验证 GPS 水汽监测系统在实际应用中的可靠性,根据成都信息工程学院地基 GPS 站观测数据反演的大气可降水量和自动气象站测得的实际降水量资料,对 2010 年 3 月 23 日-3 月 24 日(北京时间,下同)以及 3 月 30 日-4 月 1 日发生的两次降雨天气过程中 GPS 可降水量的演变特征进行了分析,以验证 GPS 可降水量是否与实况降水量有较好的对应关系,以及总结 GPS 可降水量在降雨临近前所呈现的特征。

成都 2010 年 3 月份降水较少,根据自动气象站资料显示:在 3 月 23 日前几乎没有什么降雨发生,直到 3 月 23 日成都地区才出现了一次较为明显的降雨过程,尽管降雨量不大,但是通过地基 GPS 水汽监测系统反演的该时段的 GPS 可降水量数据来看, PWV 的值对此次降水过程反映得较为敏感,有较强的预报指示作用(图 6)。从图 6 看出, 3 月 22 日 18 时以前 PWV 都维持在一个相对较低的位置(<13mm),18 时以后 PWV 的值逐渐升高,当该值达到 24mm 时就基本维持并伴有小的波动。23 日 0 时开始发生降雨过程,随着降雨的开始, PWV 呈现下降的趋势,当降雨过程结束时 PWV 值达到极小值,但仍保持在 14mm 之上。随着时间的推移, PWV 的值又开始缓慢上升,23 日 18 时第二次降雨过程开始,此时大气可降水量在高值区的波动较第一次降雨频繁,但幅度较小,随着这次降雨过程的结束, PWV 的值也逐渐回落到 12mm 左右。

对于 3 月 31-4 月 1 日的降雨个例来讲,由于

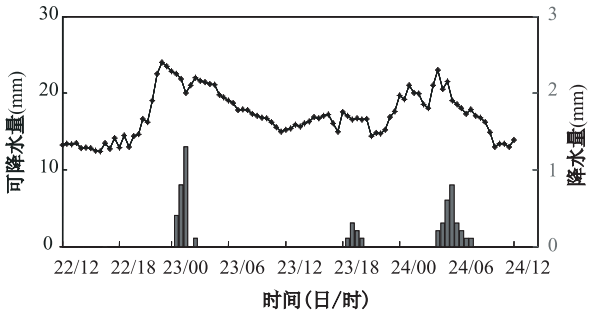


图 6 2010 年 3 月 23-3 月 24 日 PWV 与降雨量对照图
Fig. 6 Comparison of PWV and rainfall from March 23 to 24, 2010

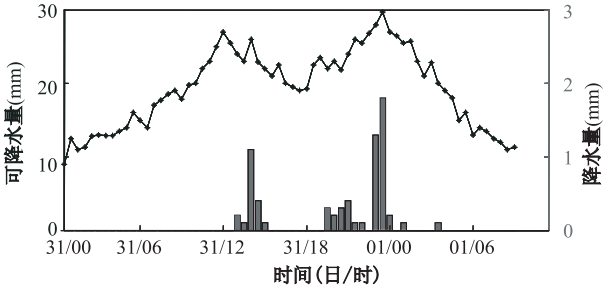


图 7 2010 年 3 月 31-4 月 1 日 PWV 与降雨量对照图
Fig. 7 Comparison of PWV and rainfall from March 31 to April 1, 2010

此次降雨过程更为明显, PWV 值的变化幅度也相对较大。从图 7 可以看出:在 3 月 31 日 00 时 PWV 的值开始逐渐升高,当 PWV 达到 28mm 时就基本维持。从 31 日 13 时开始发生降雨过程,降水开始后 PWV 值逐渐回落。但该值经过短暂回落后在 31 日 20 时又陡然上升,并且超过了第一次降水时 PWV 的峰值,达到 29.8mm。最大降水量与 PWV 峰值出现的时间有较好的对应。随着此次降雨过程的结束, PWV 的值也逐渐回落到降雨前的水平。

通过对这两次降雨过程前后 GPS 可降水量值

的变化特征,以及其与实际降雨时间的对应关系,可以得出以下一些认识:

(1)在时间尺度上,可降水量的变化趋势与实际降水量的变化趋势有较好的对应关系。降水过程开始前和结束后,可降水量分别有一个显著的递增和递减过程。

(2)可降水量在降雨发生前 6-15 小时出现急剧上升,上升到一定程度后可降水量的值便维持在高位,这有利于水汽的积累;降雨发生时可降水量的值达到最大,降水强度的极大值滞后于可降水量的峰值,这说明可降水量对降水有一定的前兆性;降雨发生后,可降水量便迅速回落,当可降水量的值下降到一定程度后,降雨即结束^[17]。

大气中可降水量维持高位是降水产生的必要条件。可降水量极大值一般提前于降水强度极大值出现的时间,即可降水量的高值阶段往往对应着较高的降水概率^[18]。因此,GPS 可降水量值的快速增加、呈现高值维持,以及相对于平均值出现较大偏差,都对强降水天气预报具有较好的指示意义。

5 结语

本研究虽然建立了近实时 GPS 水汽监测系统,但仍有许多需改进和加强的地方。由于成都信息工程学院地基 GPS 观测站网还处于试运行阶段,有些时段站点的资料缺测、误差较多,导致观测序列不连续。系统处理资料的能力还有限,资料的积累还不足,所以,后期还有很多工作需要开展:

(1)由于本系统主要针对气象业务部门,因此,在设计过程中仅考虑到气象日常业务应用,其显示界面只提供了可降水量数据的变化,没有提供其他相关信息。随着 GPS 资料的大量采集分析,应该建立一个专门数据库,方便数据的存储和调用。此外,由于目前本文所用地基 GPS 观测站网还处于试运行阶段,数据处理流程的环节较多,其中,还存在一些问题需要协调,以及进行更多解算试验来加以解决。

(2)随着同址的水汽辐射计(WVR)的安装到位,四川地区首次关于地基 GPS、无线电探空和水汽辐射计联合探测大气水汽的对比试验有望启动,这对于全面分析 GPS 监测水汽的精度以及多源水汽观测资料的集成应用非常重要。

(3)随着资料的不断积累,对于各种降雨过程

中 PWV 的变化特征,不同时间同一地点所发生的降雨过程的区别、各种降雨过程中 PWV 的阈值确定、GPS 可降水量与实际降水量的定量关系等一系列问题都值得我们今后进一步研究。

致谢:感谢美国麻省理工学院地球、大气和行星科学系授权使用 GAMIT 软件及更新补丁程序。

参考文献:

- [1] 李国平. 地基 GPS 遥感大气可降水量及其在气象中的应用研究[D]. 西南交通大学, 2007.
- [2] 宋淑丽, 朱文耀, 丁金才, 等. 上海 GPS 综合应用网对可降水量汽量的实时监测及其改进数值预报初始场的试验[J]. 地球物理学报, 2007, 47(4): 631-638.
- [3] 陈敏, 范水勇, 仲跻芹, 等. 全球定位系统的可降水量资料在北京地区快速更新循环系统中的同化试验[J]. 气象学报, 2010, 68(4): 450-463.
- [4] Saastamoinen J. Atmospheric Correction for the Troposphere and Stratosphere in Radio Ranging of Satellites[J]. The Use of Artificial Satellites for Geodesy Monographs, 1972, 15: 247-251.
- [5] Elegred G, Davis J L, Herring T A, Shapiro II. Geodesy by Radio Interferometry: Water Vapor Radiometry for Estimation of the Wet Delay[J]. Geophys. Rev., 1990, 96: 6541-6555.
- [6] Davis J L, Herring T A, Shaprio I I, *et al.* Geodesy by Radio Inter-ferometry: Effects of Atmospheric Modeling Errors on Estimates of Baseline Length[J]. Radio Sci., 1985, 20: 1593-1607.
- [7] Bevis M, Businger S, Chiswell S, *et al.* GPS Meteorology: Mapping Zenith Wet Delays onto Precipitable Water[J]. Journal of Applied Meteorology, 1994, 33: 379-386.
- [8] Boudouris G. On the Index of Refraction of Air, the Absorption and Dispersion of Centimeter Waves in Gases[J]. J. Res. Matl. Bur. Stand., 1963, 67: 631-684.
- [9] 郭洁, 李国平, 黄丁发. 基于 40 年探空资料的川渝地区对流层加权平均温度及其局地建模[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2008, 33(增刊): 43-46.
- [10] 丁金才. GPS 气象学及其应用[M], 北京: 气象出版社, 2009.
- [11] 郭洁, 李国平. 川渝地区大气可降水量的气候特征以及与地面水汽量的关系[J]. 自然资源学报, 2009, 24(2): 344-350.
- [12] 王小亚, 朱文耀, 严豪健, 等. 地面 GPS 探测大气可降水量的初步结果[J]. 大气科学, 1999, 23(5): 605

- 612.

[13] 党亚民, 王权, 冯金涛. 利用 GPS 资料反演大气水汽含量的研究[J]. 测绘科技动态, 1999 (3): 2 - 5.

[14] 李成才, 毛节泰. GPS 地基遥感大气水汽总量分析[J]. 应用气象学报, 1998, 9(4): 470 - 477.

[15] 葛茂荣, 刘经南. PC - GAMIT 软件及其应用[J]. 测绘通报, 1997(2): 21 - 23.

[16] 李国平, 黄丁发. GPS 气象学研究及应用的进展与前景[J]. 气象科学, 2005, 25(6): 651 - 661.

[17] 李国平, 陈娇娜, 黄丁发, 等. 地基 GPS 水汽实时监测系统及其气象业务应用[J], 武汉大学学报(信息科学版), 2009, 34(11): 1328 - 1331.

[18] 何平, 徐宝祥, 周秀骥, 等. 地基 GPS 反演大气水汽总量的初步实验[J]. 应用气象学报. 2002, 13(2): 179 - 183.

Construction and Application about the Monitoring System of Water Vapor Derived from Ground-based GPS in Chengdu

WANG Hao¹, LI Guoping²

(1. School of Atmospheric Physics, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China;
2. College of Atmospheric Sciences, Chengdu University of Information Technology and
the Key Laboratory of Plateau Atmosphere & Environment of Sichuan Province, Chengdu 610225, China)

Abstract: Water vapor plays a very important role in weather and climate changes. Though water vapor is very little in the atmosphere, but its change, in the atmosphere, is very obvious. Water vapor is also an important kind of greenhouse gas in the atmosphere whose spatial distribution is extremely uneven and time variation is very fast. It is not only the main driving force of weather and climate changes, but also an important formation and evolution reason for disastrous weather, especially medium or small scale disastrous weather. In satellite geodesy, GPS positioning accuracy was primarily affected by water vapor. Therefore, people learn from the elimination of noise in the measurement process, gradually to develop out of a new discipline—GPS meteorology (GPS/MET). Along with the development of GPS meteorology, people start to utilize ground-based GPS technology in order to effectively compensate for the defects of traditional detection technologies spatially and temporally and obtain water vapor information with high-precision, high-capacity and high space-time resolution ratio through ground-based GPS water vapor monitoring network. How to measure water vapor content in the atmosphere, to monitor the distribution of water vapor and its trends, which have an important practical significance to meteorological department, especially in monitoring and forecasting disastrous weather on a medium or small scale. The main content of this paper is to launch the development of ground-based GPS water vapor monitoring system; the purpose is to make this system fill in the blank of the application of GPS inversion water vapor technology in Sichuan and even the southwest areas of China, and also enhance the capacities of meteorological department on forecasting and monitoring of medium or small scale disastrous weather, as well as promote the work of many related meteorological operations.

Key words: water vapor; GPS; perceptible water vapor; monitoring system