

# 地基 GPS 水汽实时监测系统及其气象业务应用

李国平<sup>1</sup> 陈娇娜<sup>1</sup> 黄丁发<sup>2</sup> 郭 洁<sup>3</sup>

(1 成都信息工程学院大气科学学院,成都市西南航空港经济开发区学府路一段 24 号,610225)  
(2 西南交通大学测量工程系,成都市二环路北一段 111 号,610031)  
(3 中国气象局成都高原气象研究所,成都市光华村街 20 号,610071)

**摘 要:**通过 GPS 观测网提供高时空分辨率、连续、全天候实时地测量数据,反演出实时的大气可降水量的变化序列,由此在气象综合信息分析处理平台上构建成都地区 GPS 水汽实时监测及气象业务应用系统,为灾害性天气(如暴雨、持续性阴雨、雨雪、浓雾)监测和短时临近预报提供重要依据,并可为多学科综合研究大气水汽的时空变化以及空中水资源的开发利用奠定基础。

**关键词:**地基 GPS;遥感;可降水量;高影响天气;实时监测系统

**中图法分类号:**P228.42

目前,地基 GPS 技术已逐渐成为一种有效的、高时间分辨率的大气水汽探测技术,通过高密度的站点分布有效地弥补探空资料在时空分辨率上的不足,提供高精度、高容量、快速变化的大气水汽信息。1992 年,美国 Bevis 等<sup>[1]</sup>提出利用 GPS 技术监测大气可降水量(precipitable water vapor,PWV)的原理。20 世纪 90 年代以来,国内外开展了一系列试验证明了 GPS 具有与无线电探空仪和水汽微波辐射计相同的精度<sup>[2-6]</sup>。但这些试验数据多利用国际 GPS 服务(IGS)的永久跟踪站和个别临时设置的 GPS 观测站,观测时段短,资料的连续性也不够理想,无法投入到气象部门日常业务的使用中,并且国内的大部分 GPS/MET 试验都集中在上海、北京、香港、武汉和沿海地区<sup>[4-9]</sup>。因此,在水汽丰富且变化特色鲜明的西南地区构建连续、实时的 GPS 观测网,实现 GPS 水汽产品的实时反演及其在天气预报等气象业务中的应用具有重要意义。

## 1 成都地区地基 GPS 观测网

成都地区地基 GPS 观测网目前有成都、大邑、龙泉驿、金堂、蒲江、都江堰 6 个观测站点,该

网以成都站为中心,外围的 5 个测站构成稳定的多边形测量结构,平均站间距为 52 km,空间分辨率处于当前国内先进水平。其中,成都市勘察设计院负责地面 GPS 接收机的建设,采用美国 Trimble 5700 型双频 GPS 接收机;成都市气象局负责同址配套的自动气象站建设,采用中国华云公司的 6 要素自动气象站。

## 2 地基 GPS 水汽监测应用系统

地基 GPS 水汽监测应用系统的设计主要是面向气象部门的业务人员,尽可能地降低数据处理的时间间隔,提高时间分辨率,使用户能在第一时间内获得水汽的时空分布信息,达到实时监测、实时应用的目的。图 1 是地基 GPS 水汽应用系统的组成及工作流程,其组成主要包括数据采集、数据融合、数据解算以及数据反演和产品输出四个部分。数据采集主要是采集地基 GPS 接收机及自动气象站的原始观测数据,通过 FTP 传输到指定的计算机。数据融合主要是下载 GPS 解算软件解算时所需要的辅助数据(如星历数据),并通过 GPS 数据处理软件与原始观测数据融合解算出 ZTD。通过地基 GPS 遥感水汽的流程得到

大气中的可降水量(GPS-PWV),用于分析 GPS-PWV 的时间演变序列和空间分布,并构建基于气象部门天气分析预报基本业务平台——气象信息综合分析处理系统(MICAPS)上的应用模块,从而方便、快捷地为气象业务人员提供近实时、高分辨率、高精度的大气水汽时空演变信息。

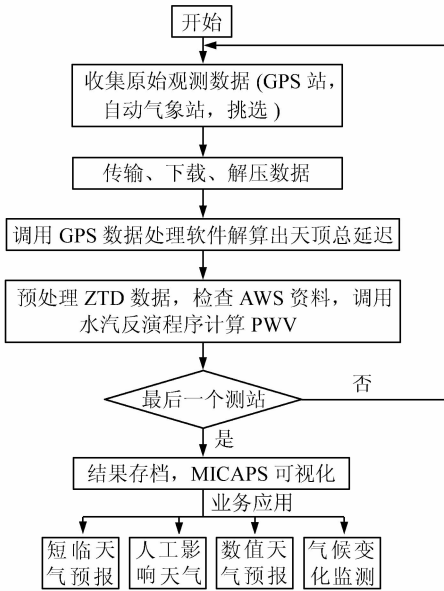


图 1 成都地基 GPS 水汽监测应用系统示意图  
Fig. 1 Application System of Water Vapor Monitored by Ground-based GPS in Chengdu Plain

3 成都地区地基 GPS 观测网的应用

3.1 地基 GPS 遥感可降水量对夏季暴雨的预示

2007 年 8 月 26~31 日,成都地区出现了连续的强降水天气过程。图 2(a)为成都站 2007 年 8 月 26 日~31 日 GPS-PWV 的时间序列,可以看出,GPS-PWV 的变化曲线表现为 6 个波峰和波谷交替出现,即存在显著的日变化,波峰出现在午后,其中 27 日 15~17 h(北京时,下同)、29 日 15~17 h 为第一、二峰值;波谷则主要出现在夜间至清晨(00~09 h)的时段内。几次暴雨过程的降水时间和 GPS-PWV 变化曲线的对比分析表明,GPS-PWV 短时间内的快速增加往往对应有强降水过程出现,特别是暴雨发生前 5~10 h,GPS-PWV 的激增可很好地预示其后的强降雨天气。

3.2 地基 GPS 遥感可降水量对秋季暴雨的反映

2008 年 9 月 22 日 20 h~26 日 20 h,成都地区出现了一次持续性区域暴雨过程。此次降水过程可分为 3 个阶段,首先是出现在 22 日 20 h~23 日 20 h 的暴雨,暴雨中心在成都西北部,最大雨量为 137.2 mm,小时最大降雨量达 50.9 mm。

其次是 23 日 20 h~24 日 20 h 的暴雨,暴雨中心出现在市区到新都,最大雨量达 174.2 mm,小时最大降雨量达 45.1 mm。这两场暴雨的雨量分布不均匀,且伴有强雷暴,具有明显的对流性降水特征。第三阶段区域性暴雨出现在 25 日 20 h~26 日 20 h,暴雨中心出现在成都西南部的蒲江,降雨量为 114.8 mm,小时最大降雨量达 18.8 mm,降雨持续时间长,雨量分布比较均匀,具有连续性的稳定降水特征。

图 2(b)中 GPS-PWV 的变化曲线呈现升-降-升的趋势,3 个峰值分别对应了降雨的最大值。在降水发生前,水汽出现上升,并且在首次强降水之前,水汽上升幅度大,随着强降水的结束,水汽下降。即当 GPS-PWV 由谷底缓慢上升或由峰顶缓慢下降时,对应着实际降水的开始和结束。但是降水也不是在 GPS-PWV 到达高值平台后就出现,而是经过几 h 的上下波动后才产生;降水呈现明显的阵性,较大的 1 h 降水量总是出现在 GPS-PWV 波动过程中一个相对高值点之后,即在 GPS-PWV 时间序列中一个波峰后面紧跟着一个降水的峰值;在 GPS-PWV 振荡下降后,雨量变小或降水暂停,直到 GPS-PWV 再次上升到下一个相对高值点。

进一步分析表明,GPS-PWV 上升的急剧程度与实际降水强度有较好的对应。在第 1 次暴雨过程中,GPS-PWV 开始增加到出现降水的平均小时增幅达到 3.4 mm,第 2 次暴雨过程中,GPS-PWV 平均小时增幅达到 8 mm,降雨出现在 GPS-PWV 开始增加后的第 4 个小时,最大雨强出现在 GPS-PWV 增加后的第 12 个小时。第 3 次暴雨过程中,GPS-PWV 增幅为 2 mm/h。因此,雨强与 GPS-PWV 的增幅有较好的对应关系。

3.3 秋季连阴雨天气中 GPS-PWV 的变化特征

2007 年 9 月 6~14 日,成都地区出现了一次明显的秋季连阴雨(华西秋雨)过程,此次天气过程持续了 9 d,降雨量为小到中雨,日最大降雨量为 28.3 mm,过程总雨量最大在蒲江(130.4 mm)。分析 GPS-PWV 与实况降水的时间序列图(图 3)以及空间分布图(图 4)可以得出,降雨前,GPS-PWV 出现连续大幅递增,超过平均值并处于较高水平;而当 GPS-PWV 连续大幅递减,并大大低于其平均值时,则预示着降雨过程结束。

3.4 冬季雨雪天气中 GPS-PWV 反映的水汽输送异常强信号

图 5 为 2008 年 1 月 11~20 日成都站逐时的

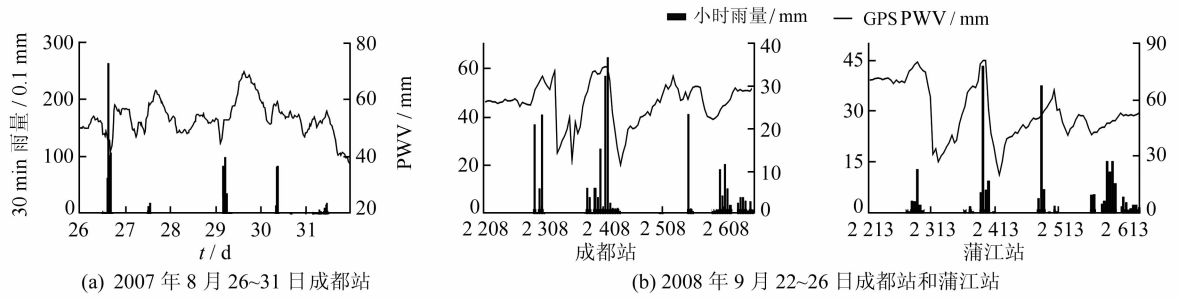


图 2 GPS-PWV 和雨量的时间序列  
Fig. 2 Time Series of GPS-PWV and Rain

GPS-PWV 和降雨(雪)量的时序图,可以看出,降雨发生时,与 GPS-PWV 的峰值区相对应。在 GPS-PWV 发生第一次激增以后,由于水汽需要一个积累过程,并没有出现明显的降雨;而从 15 日 19 h 开始至 17 日 15 h,在短短 45 h 内,GPS-PWV 从 2.13 mm 增至 15.17 mm,增幅为 0.3 mm/h,此

后,大气可降水量一直保持在一个相对高的水平,成为持续性雨雪天气来临的一个明显特征。因此,GPS-PWV 的变化序列能够反映持续性低温雨雪天气开始、发展以及过程变化的特点,GPS 监测网揭示的水汽变化是水汽输送异常的强信号之一,可为预报雨雪天气提供重要的参考依据。

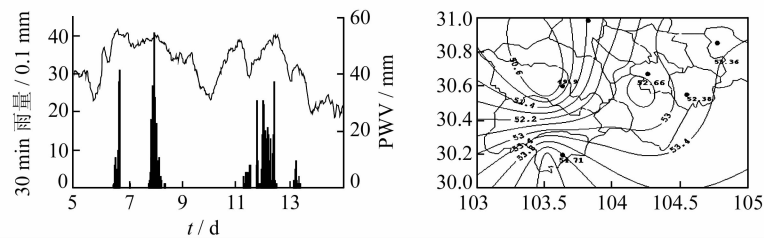


图 3 成都站 2007 年 9 月 5~14 日 GPS-PWV 和雨量的时间序列图  
Fig. 3 Time Series of GPS-PWV and Rain from 5 to 14, Sep. 2007 in Chengdu Station

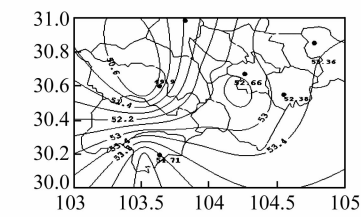


图 4 2007 年 9 月 6 日 12 时成都地区 GPS-PWV 的空间分布图  
Fig. 4 Space Field of GPS-PWV on 12:00 6, Sep. 2007 in Chengdu Plain

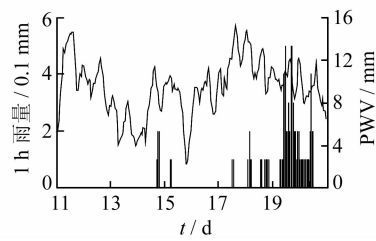


图 5 成都站 2008 年 1 月 11~20 日雨雪天气过程中 GPS-PWV 与雨量的时间序列图  
Fig. 5 Time Series of GPS-PWV and Rain from 11 to 20, Jan. 2008 in Chengdu Station

3.5 GPS-PWV 对预报大雾天气的作用

通过对 2007 年 12 月 9 次大雾天气过程中 GPS-PWV 的时间序列进行分析,给出有雾和无雾情况下 GPS-PWV 的日合成变化(图 6),可以看出,大雾出现时,GPS-PWV 具有明显的日变化

特征,且出雾前(7 点以前),GPS-PWV 的变幅较无雾时明显偏大,说明 GPS-PWV 可为大雾天气的短临预报提供有价值的参考信息。

4 结 语

成都地区 GPS 观测网把 GPS 这一高新技术综合应用于成都地区的气象服务中,通过连续、实时的 GPS 测量数据反演出实时的大气可降水量,用于监测大气水汽的时空变化,为短临天气预报和气候变化监测提供依据,增强了短临天气预报特别是转折性天气预报的能力,并可为多学科综合研究水汽输送与循环以及空中水资源的开发利用奠定基础。在成都市气象台投入使用以来,在一些重大天气过程的监测中初见成效。但本应用在进一步提高 GPS 原始数据的解算精度、改善 GPS 可降水量序列的连续性(包括替代方案)

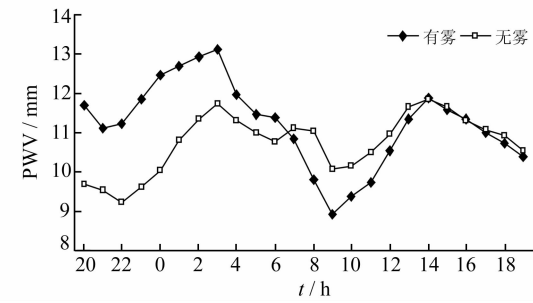


图 6 成都站 2007 年 12 月有雾和无雾时 GPS-PWV 的合成日变化  
Fig. 6 Composite Diurnal Cycle of Foggy and Fogless Day in December 2007 in Chengdu Station

和稳定性、GPS 水汽产品在新一代 MICAPS 平台上的多要素实时动态显示及综合分析、GPS 水汽产品的业务化应用指标及应用领域拓展、层析技术反演水汽廓线(垂直分布)等方面还有待深入的研究。

致谢:感谢成都市勘察设计院提供 GPS 原始观测数据解算出的天顶总延迟资料,以及成都市气象局局长林勇、副局长陈祯烈、郝丽萍对本文工作的有力支持。

参 考 文 献

[1] Bevis M, Businger S, Herring T A, et al. GPS Meteorology: Remote Sensing of Atmospheric Water Using the Global Positioning System[J]. Journal of Geophysics Research, 1992, 97:15 787-15 801

[2] Rocken C, Van Hove T, Johnson M, et al. GPS/STORM-GPS Sensing of Atmospheric Water Vapor for Meteorology [J]. Atmos and Ocean Tech , 1995, 12:468-478

[3] Businger S, Chiswell S, Bevis M, et al. The Promise of GPS in Atmospheric Monitoring[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 1997, 77

(1): 1-18

[4] 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

[5] 李成才,毛节泰,李建国,等. 全球定位系统遥感水汽总量[J]. 科学通报,1999, 44(3):333-336

[6] 刘焱雄. 地基 GPS 技术遥感香港地区大气水汽含量[J]. 武汉测绘科技大学学报,1999,24(3):245-248

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

[8] 梁丰,李成才,王迎春,等. 应用区域地基全球定位系统观测分析北京地区大气总水汽量[J]. 大气科学, 2003, 27(2):236-244

[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

第一作者简介:李国平,教授,博士,博士生导师,研究方向为 GPS 气象学、天气气候动力学。  
E-mail:liguoping@cuit.edu.cn

Real-time Monitoring System of Precipitable Water Vapor Derived from Ground-based GPS and Its Applications in Meteorology

LI Guoping<sup>1</sup> CHEN Jiaona<sup>1</sup> HUANG<sup>1</sup> Dingfa<sup>2</sup> GUO Jie<sup>3</sup>

(1 College of Atmospheric Sciences, Chengdu University of Information Technology, 24 Xuefu Road, Chengdu 610225, China)

(2 Department of Surveying Engineering, Southwest Jiaotong University, 111 Erhuan Road, North 1st Section, Chengdu 610031,China)

(3 Institute of Plateau Meteorology, China Meteorological Administration, 20 Guanghuacun Street, Chengdu 610071,China)

**Abstract:** The structure of real time system of monitoring water vapor derived from ground-based water is introduced. Its applications in meteorology are analyzed based on the precipitable water vapor derived from ground-based GPS. The time series of real time GPS-PWV is retrieved from observation data of being high spatial-temporal resolution, continuous, whole day and real time supplied by GPS networks. The application system of water vapor monitoring by ground-based GPS is constructed based on that. It supplies instruction for monitoring atrocious weather and short-time weather forecast, establishes the foundation for studying spatial-temporal distribution of atmospheric water vapor and exploiting atmospheric water resource through many disciplines.

**Key words:** ground-based GPS; remote sensing; precipitable water vapor; high impact weather; real time monitoring system