

# GPS 遥感区域大气水汽总量研究回顾与展望

李国平<sup>1,2</sup> 黄丁发<sup>1</sup>

(1 西南交通大学地理空间信息工程中心,成都 610031;  
2 成都信息工程学院地球环境科学系,成都 610041)

**摘要** 20 世纪 90 年代以来, GPS 气象学迅速发展成为一个前沿性、多学科交叉的研究领域, 利用 GPS 技术探测大气水汽含量的研究取得了很大进展, 有望在未来大气探测、天气预报和气候变化的研究和业务工作中发挥重要作用。文章论述了利用 GPS 遥感大气水汽总量的气象学意义, 比较了该技术相对于其它探测方法的特点和优势, 简介了 GPS 遥感大气水汽总量的类型以及地基 GPS 气象学的基本原理, 对国内外近 10 年来在应用地基 GPS 技术遥感大气水汽总量方面取得的主要成果、应用现状及未来发展趋势做了综合性评述。最后, 分析了该技术目前存在的主要问题。

**关键词** GPS 遥感 水汽总量

## 引言

水汽及其变化是天气和气候的主要驱动力, 是预测降雨、中小尺度恶劣天气以及全球气候变化的一个非常重要的物理量。水汽的分布极不均匀, 时空变化很大, 是大气成分中变化最大的一种。由于影响水汽含量和分布的因素较多, 加之目前探测技术的局限性, 测定大气湿度(包括水汽和云)仍是一个难题, 观测资料的实时性、充足性较差。因此, 水汽也是人们认识得不够充分的大气成分之一。如何在现有技术条件下更精确、更及时地确定大气中的水汽含量, 是当今大气科学所面临一项重要任务。

目前探测大气水汽含量的方法主要有:(1)无线电探空技术, 即通过施放探空气球, 收集有关的温度、气压、湿度等气象要素来计算水汽含量。因无线电探空成本较高, 相对于地面观测站而言探空站分布稀疏, 并且一般每天仅进行早晚 2 次探测, 不足以分辨水汽的时空变化, 因此不能很好地监测大范围的天气变化(如雷雨和多变天气)。(2)使用水汽微波辐射计(WVR)。目前微波辐射计是探测大气水

汽最为精确的一种设备。但地基微波辐射计在有浓云时穿透能力下降, 特别是有降水发生时误差更大。而星载微波辐射计由于受背景温度影响较大, 在陆地上的测量精度较低。同时微波辐射计价格昂贵, 也限制了其广泛应用。(3)气象飞机探测。由于成本很高, 只能用于个别地区的特殊观测。(4)地面湿度计观测。测定的是近地层空气的湿度状况, 不能反映高空大气的水汽含量, 对预报剧变天气和降水的作用非常有限。(5)气象卫星观测。可通过红外线观测得到大气水汽含量, 但仅在无云区才能获知水汽含量的垂直分布。

由于水汽在天气分析和预报、微气象学、全球气候变化等领域具有非常重要的意义, 特别是大气中水汽随时空的变化对气象预报特别是对水平尺度 100 km 左右、生命史只有几小时的中小尺度灾害性天气(如暴雨、冰雹、雷雨、大风、龙卷风等)的监测、预报具有特别重要的指示作用。而目前气象上获取水汽资料主要依赖于常规的探空站网, 费用昂贵, 站点分布间距 300 km 以上, 间隔 12 h 观测 1 次, 远不能满足监测和预报中小尺度灾害性天气的需要, 成

国家自然科学基金( No.40271091)、西南交通大学博士生创新基金(2003)和成都信息工程学院科技发展基金( No.CSRF200302)项目资助  
作者简介:李国平,男,1963 年生,教授,在读博士生,从事陆面物理过程与气候变化、高原天气系统动力学、GPS 气象学研究,

Email: liguoping@cuit.edu.cn

收稿日期:2003 年 7 月 22 日;定稿日期:2003 年 10 月 23 日

为这类灾害性天气容易漏报的重要原因之一。如果采用一种新型大气水汽探测手段即 GPS 遥感技术, 则可以获得半小时至几分钟时间分辨率、 $1 \sim 2 \text{ mm}$  精度包括垂直分布廓线等信息的水汽资料, 可有效弥补探空资料在时间分辨率上的不足, 提供高精度、大容量、快速变化的大气水汽信息。

### 1 GPS 遥感大气水汽总量技术简介

当 GPS 信号穿越对流层大气时, 会受其影响而产生信号延迟, 与大气参数有关的折射率也将发生变化。由于信号延迟和大气参数之间具有很好的相关性, 因而可用 GPS 技术以遥感的方式来探测大气参数, 研究对流层大气。近年来, 由于 GPS 软、硬件技术的飞速发展, GPS 精密测量的精度越来越高, 使得人们可求得较为精确的对流层延迟值, 进而可算出较为精确的大气垂直积分水汽含量 (IWV, Integrated Water Vapor) 或对流层大气水汽总量 (PW, Precipitable Water, 也称 PWV, Potential Water Vapor, 即可降水量)。现在, 常把利用 GPS 技术遥感的大气水汽总量用 GPS PWV 来表示。

由于运用 GPS 技术估算大气水汽总量是 20 世纪 90 年代兴起的一种极有潜力、实用价值很大的一种新型大气探测技术, 属于前沿性、多学科交叉的研究领域, 所以近年来 GPS 气象学 (GPS Meteorology, 简称为 GPS/Met) 的研究已成为 GPS 应用的热点方向之一。其主要任务是探测对流层大气的细致特征, 例如折射率、湿度、温度、密度、压力和风。就测量大气水汽总量而言, GPS 接收机是全球地学界所关注的一种新型遥感器, 它可严密监测全球大气水汽含量, 对于全球变化的研究也很重要。研究表明, 水汽作为温室气体在全球变暖中具有明确的反馈效应, 较高的大气温度会提高大气保持水汽的能力。综上所述, 由于 GPS 技术探测大气水汽具有成本低、精度高、时间分辨率高、可全天候观测等优点, 特别是 GPS 在任何天气条件下获得精确信号的能力较强 (包括在有很厚的云层覆盖时), 所以已开始作为一种新的遥感探测手段应用于大气水汽的研究和业务应用试验, 并已开始或即将开始成为下一代高空大气观测系统重要的组成部分, 在未来天气预报技术的发展中也将扮演重要角色。另外, GPS 技术探测大气水汽的技术在水分平衡和水汽循环研究、空中水资源开发利用等领域也可大有作为。

根据 GPS 接收机的位置, GPS 遥感大气水汽含量可分为地基和空基两种技术。地基 GPS 遥感技术目前已较为成熟, 能以较高的水平分辨率测定大气水汽总量, 其精度可达  $1 \sim 2 \text{ mm}$ 。地基 GPS 在遥感对流层大气时, 探测数据具有覆盖全球、高垂直分辨率、高精度、高长期稳定性 (时间连续)、硬件集成化程度高、成本低、设备消耗少、易于维护、不需校准、不受云中雨滴或冰相粒子干扰等诸多优点, 可显著提高天气预报 (包括数值天气预报) 的准确性和可靠性。但也应看到, 由于地基 GPS 只能遥测观测路径上的大气水汽总量, 不能提供水汽的垂直分布信息, 因此地基 GPS 水汽观测具有良好的时间覆盖率 (近于实时) 而缺乏空间分辨率。正在兴起的空基 GPS 技术 (也称无线电掩星技术, 简称 RO) 恰恰具有良好的空间分辨率而缺乏时间覆盖率, 后者适用于遥感大气温度、水汽的垂直分布廓线。因此, 地基 GPS 和空基 GPS 技术的结合可在气象监测和预报中更好地应用 GPS 技术获得的大气水汽信息。

地基 GPS 气象学其技术原理是将 GPS 接收机设置于地面, 像常规的 GPS 测量一样, 通过地面布设 GPS 接收机网来估计某个地区的气象要素。遥感大气中的 PWV 是地基 GPS 气象学的主要目标之一, 可提供几乎连续的、高精度的 PWV 数据或通过排除信号、保留干扰来确定云层的厚度、性质和移动, 用于恶劣天气的监测和预报。由于 GPS 气象学可以成功地从 GPS 信号中提取大气水汽分布的信息, 并且信号不受天气的影响, 故可以 24 h 不间断地监测大气的变化, 这为气象预报提供了更为先进的手段。对某些天气预报时间分辨率要求高或地面常规气象站分布稀疏的地区, 应用 GPS 技术探测大气水汽对短时或临近天气预报 (nowcasting) 极有价值。由地基 GPS 估计大气水汽总量的可行性和测定精度, 已在与同时段无线电探空观测结果和水汽微波辐射计观测结果的直接比较中得到肯定。美国 55 个 GPS 网络工作站的测试表明: 地基 GPS 遥感大气水汽总量不仅能真实反映大气湿度的分布情况, 而且其精度明显高于其他类型的湿度观测系统, 在大气相对湿度 3 h 预报中具有绝对优势, 可明显改进降水的 3 h 预报效果。目前全球连续观测的常设 GPS 大地测量阵列 (PGGA) 的规模和能力已可与全球无线电探空网 (大约 600 个站) 相抗衡。

## 2 国外研究现状

1992年美国 Bevis 等人提出了采用地基 GPS 估算大气水汽含量的原理<sup>[1]</sup>。1992~1997年美国经过多次地基 GPS 试验(其中比较著名的是1993年进行的 GPS/STORM 观测试验)表明:GPS 可作为具有高时间分辨率的动态测定大气水汽的“气象站”,以 GPS 估算水汽与微波辐射计的对照精度为1~2 mm(相对水汽总量法)和1~1.5 mm(绝对水汽总量法)<sup>[2~4]</sup>。1998年又进行了 GPS/Met 计划,对地基 GPS 和空基 GPS 技术在遥感大气水汽含量方面的结合应用进行了试验<sup>[5]</sup>。此外,美国和加拿大的一些研究机构合作实施的 Westford 水汽试验(WWAVE),主要目的也是对应用地基 GPS 测定大气可降水量进行评估。该试验证明了这一技术的可行性,在冬天的某些地区,GPS PWV 的精度从未低于1.5 mm,并且这种精度在与无线电探空系统的比较中不断得到肯定。美国 NASA/JPL(国家航空航天局喷气推进实验室)现已研究出几种准实时处理 GPS 数据并可算出较精确的大气水汽总量的方法,用于数值天气预报和短时天气预报。目前,美国等发达国家已经开始发展投入业务应用的地基 GPS 观测网。

日本地理测量院(GSI)自1994年起就布设全国 PGGA,现已拥有约1200个测站。该阵列的空间分辨率与日本气象厅(JMA)的气象数据自动获取系统(AMeDAS)的空间分辨率相当。这种 PGGA 与气象观测系统的组合,对大地测量学和气象学之间的交叉研究非常有利。1998~2003年,在日本科技厅资助、GSI 组织下实施了日本地基 GPS 气象学计划(GPS/Met Japan)<sup>[6]</sup>,该计划的一个重要目标就是建立由 PGGA 测定的大气水汽总量的数据库。这些数据将被用于 JMA 数值天气预报模式的四维数据同化系统中,以改进中尺度系统(如锋面、台风)和局地恶劣天气(如暴雨、雷暴)的预报。此外,该数据库也可供卫星遥感、大气污染研究、水分循环研究和洪水预报使用。由于日本拥有全球最密集的 PGGA 和地面气象观测网,加之又有现代化的数值天气预报系统,两者的组合,使日本目前处于世界地基 GPS/Met 研究及应用的领先地位,同时也促使大地测量学、气象学和地球物理学之间的联系前所未有地紧密。值得一提的是,该计划2000年秋季和

2001年春季在筑波地区20 km<sup>2</sup>的范围内进行了2次 GPS 高密度网观测(Tsukuba GPS Dense Net Campaign),目的是探测几公里量级的小尺度水汽变化并用于短时雷暴、暴雨等灾害性天气的预报。试验区域内集中设立了75个 GPS 接收点和22个地面气象观测点,其 GPS 接收站点的间距达到空前的1~3 km。在 GPS/Met Japan 计划结束之后,日本目前正酝酿一个有关空基 GPS 气象学的观测计划。

地基 GPS 永久跟踪站应用于天气预报已经历了数年的试验,特别在欧洲(以德国、瑞典为代表)现已将其作为大地测量学和气象学结合起来为社会服务的一个重大项目。1999年开始,欧洲15个国家联合进行了地基 GPS 永久跟踪站网的数据用于数值天气预报的研究,有近100个 GPS 站将其观测数据或天顶总延迟(TZD)传输给数据中心,然后换算为气象学上的水汽总量。欧洲已开发出了高精度、快速(近实时)GPS 星历服务,这对于从天顶总延迟计算大气水汽总量的精度至关重要。

## 3 国内研究现状

20世纪90年代中期,中国科学院上海天文台的严豪健、朱文耀等在我国较早开展了地基 GPS 气象学及其在恶劣天气分析中应用的研究。利用国内分布的23个 GPS 网站及周边地区的6个国际地球动力学服务系统(IGS)GPS 永久跟踪站,组成了一个区域性地面试验网,进行了我国首次 GPS/Met 试验。与国内 GPS 网中具有无线电探空观测的4个高空气象站(上海、武汉、长春和西宁)的资料比较后发现:GPS 可降水量(GPS PWV)和无线电探空可降水量(SONDE PWV)之间的平均误差为3~4 mm。此外,考虑到上海地区夏季天气变化剧烈、台风活动频繁等因素,选择1997年8月上旬和下旬两个观测时段,进行了国内第一个 GPS/STORM(GPS 风暴)试验。结果表明,地面 GPS 网可获得几乎实时、连续和高精度的可降水量值,并且可很好地与实时降雨量和降雨过程相对应<sup>[7]</sup>。

北京大学李成才、毛节泰等人<sup>[8~10]</sup>,利用1997年夏季共3周的东亚地区 GPS 跟踪站数据和 IGS 星历,结合相应的地面气象资料反演了上海和武汉的大气水汽总量,与探空资料获得的水汽总量的对照均方根误差为5 mm 左右。

中国测绘科学研究院党亚民<sup>[11]</sup>利用北京、上海

和武汉3个GPS跟踪站的实际观测资料反演了相应的大气水汽含量。该研究院的丁继新等人<sup>[12]</sup>也用我国沿海地区5个测站(大连、青岛、闸坡、坎门、厦门)的GPS数据解算出对应的大气水汽总量。

武汉测绘科技大学刘焱雄<sup>[13~15]</sup>应用地基GPS技术遥感了香港地区大气水汽含量,提出了计算大气水汽含量的分段多项式方法,并结合无线电探空资料,分析出遥感的精度为1~2 mm。

中国气象科学研究院何平等<sup>[16]</sup>在1998年5~6月期间实施的“海峡两岸及临近地区暴雨试验”(HUAMEX)中在汕头、阳江、海口进行了地基GPS长时间连续估测大气水汽总量的外场试验。探空资料与GPS反演结果的比较表明:两者随时间演变的趋势一致,但GPS反演的水汽总量比探空资料计算的结果平均偏低6.5 mm,偏差量的均方差为4.3 mm。在随后该研究院参与主持的国家重点基础研究发展规划(973)项目中也开展了强暴雨系统的GPS/Met探测方法的研究。

北京市气象局梁丰等<sup>[17]</sup>利用2000年6月1日至8月11日在京津地区10个测站进行的我国气象界首次区域性地基GPS网遥感大气水汽总量试验资料,分析了北京地区夏季大气水汽总量的时间、空间变化,研究了大气水汽总量与日平均温度、地面水汽压和降水的关系。

在GPS探测大气水汽应用于天气预报的业务工作方面,2000年上海多个部门联合在全国率先兴建以上海为中心覆盖整个长江三角洲地区的GPS综合应用网(SCGAN),其中包括由14个GPS基准站组成的GPS气象服务子网。SCGAN于2002年6月投入正式运行,已利用获得的2002年入梅前后长江三角洲地区高分辨率可降水量资料,分析出入梅过程中水汽变化空间分布的细微特征,并将GPS PWV资料同化到中尺度数值模式MM5的初始场中,通过优化初始场来提高模式对降雨量的预报能力<sup>[18]</sup>。

2002年8月,北京市气象局在北京汛期降水的主要水汽输入通道——房山区建成了由8个站组成的地基GPS水汽遥测站网,已用瑞士Bernese GPS数据分析软件对解算大气可降水量进行了初步试验,并与传统无线电探空资料计算的可降水量进行了对比。

2003年初,广东省也计划用3年时间兴建1个

与长江三角洲类似的珠江三角洲GPS应用网。这种区域GPS气象网的建立可近实时地提供水平空间密度100 km左右,时间间隔30 min一次的准连续的、精度优于2 mm的大气可降水汽量序列,这将大大提高监视和预报中小尺度灾害性天气能力,减少漏报次数,对提高天气预报特别是灾害性天气的预报能力及其准确度具有重要意义,为更好地适应社会对气象预报“更早、更准、更细”的要求提供了高新技术支持。

#### 4 结语

由于GPS技术探测大气水汽的研究及应用还处于探索、试验阶段。在以下几个方面尚需开展更加深入的工作:

(1) GPS定位、定时的精度及GPS反演大气水汽的精度还需进一步提高,GPS跟踪技术和算法也需改进。

(2) 目前GPS PWV数据还不能满足天气预报员在临近预报中期望每隔几分提供一次大气水汽资料的所谓“最新”或“第一时间”的要求。

(3) 应最大限度地利用GPS探测到的大气水汽信息与目前业务上使用的水汽探测资料(如无线电探空、气象卫星观测)有机结合,实现优势互补,从而更有效地提高大气水汽探测的水平。

(4) GPS遥感低层大气的误差源还比较多,而大气水汽含量恰恰集中在3 km以下的低层大气。

(5) 各地在应用GPS技术遥感大气水汽总量时,应建立适合当地特点的计算模型,例如对流层加权平均温度的计算公式。

(6) 研究GPS PWV数据在天气分析、短时预报中应用的具体方法,制定GPS水汽资料对天气预报效果改进的评价标准。

(7) 加强应用GPS水汽同化资料改进数值天气预报效果的研究及业务试验。

#### 参考文献

- 1 Bevis M, Businger S, Chiswell S, et al. GPS meteorology: mapping wet delays onto precipitable water. *Journal of Applied Meteorology*, 1994, 33: 379 - 386
- 2 Duan Jingping, Bevis M, Fang Peng, et al. GPS meteorology: direct estimation of the absolute value of precipitable water. *Journal of Applied Meteorology*, 1996, 35: 830 - 838
- 3 Ware R, Exner M, Feng D, et al. GPS sounding of the atmosphere

- from low earth orbit: preliminary results. Bulletin of the American Meteorological Society, 1997, 77(1): 19 - 40
- 4 Businger S, Chiswell S, Bevis M, et al. The promise of GPS in atmospheric monitoring. Bulletin of the American Meteorological Society, 1997, 77(1): 1 - 18
  - 5 Reigber C. Water vapor monitoring for weather forecast. GPS World, 2002, 13(1): 18 - 27
  - 6 Tsuda T, Heki K, Miyazaki S, et al. GPS meteorology project of Japan: Exploring frontier of geodesy. Earth Planets Space, 1998, 50(1): 1 - 5
  - 7 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. 大气科学, 1999, 23(5): 605 - 612
  - 8 李成才, 毛节泰. GPS 地基遥感大气水汽总量分析. 应用气象学报, 1998, 9(4): 470 - 477
  - 9 李成才, 毛节泰, 李建国, 等. 全球定位系统遥感水汽总量. 科学通报, 1999, 44(3): 333 - 336
  - 10 李建国, 毛节泰. 使用 GPS 系统遥感水汽分布原理和中国东部地区  $T_m$  回归分析. 见: 吕达仁主编. 大气环境和气候变化探测与过程研究. 北京: 气象出版社, 1997. 78 - 87
  - 11 党亚民, 王权, 冯金涛. 利用 GPS 资料反演大气水汽含量的研究. 测绘科技动态, 1999, (3): 2 - 5
  - 12 丁继新, 成英燕, 王权, 等. 利用 GPS 技术遥感大气对流层水汽含量的研究. 测绘科学, 2002, 27(2): 16 - 19
  - 13 刘焱雄. 地基 GPS 技术遥感香港地区大气水汽含量. 武汉测绘科技大学学报, 1999, 28(3): 245 - 248
  - 14 刘焱雄. 利用地面气象观测资料确定对流层加权平均温度. 武汉测绘科技大学学报, 2000, 25(3): 400 - 404
  - 15 刘焱雄, 陈永奇. GPS 气象学中垂直干分量延时的精确确定. 测绘学报, 2000, 29(2): 172 - 180
  - 16 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. 应用气象学报, 2002, 13(2): 179 - 183
  - 17 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. 大气科学, 2003, 27(2): 236 - 244
  - 18 宋淑丽, 严文耀, 丁金才, 等. 上海 GPS 综合应用网对 2002 年长江三角洲地区入梅过程的监测. 天文学进展, 2003, 21(2): 180 - 184

## Reviews and Prospects of Researches on Remote Sensing of Regional Atmospheric Water Vapor Using Ground Based GPS

Li Guoping<sup>1,2</sup> Huang Dingfa<sup>1</sup>

(1 Center of Geomatic Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031; 2 Department of Earth and Environmental Sciences, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610041)

**Abstract:** GPS meteorology has been become a frontier research field and intercrossed subject since 1990's, and the remote sensing of atmospheric water vapor using GPS also has made obvious progress. This new technique will play an important role in researches on atmospheric sounding, weather forecasting and climatic change, as well as on operational applications. The significance of remote sensing of regional atmospheric water vapor by GPS in meteorology is discussed and the peculiarity and superiority of GPS technique are compared with other sounding methods. The methods and principles of remote sensing of regional atmospheric water vapor by ground-based GPS are introduced, and the present situation and prospects in the remote sensing of potential water vapor in recent 10 years by using the regional ground-based GPS network at home and abroad are analyzed. Some major problems need to be solved in this field are pointed out.

**Key words:** GPS, remote sensing, potential water vapor