

# 地基 GPS 遥测大气可降水量在天气分析 诊断中的应用

陈小雷<sup>1,2</sup> 景 华<sup>2</sup> 仝美然<sup>2</sup> 范军红<sup>2</sup> 马翠平<sup>3</sup> 李青春<sup>4</sup>

(1. 兰州大学大气科学学院, 730000; 2. 河北省气象台;  
3. 河北省气象科技服务中心; 4. 北京城市气象研究所)

**提 要:** 利用河北省石家庄、张家口、秦皇岛 3 个 GPS 站观测资料, 通过 GAMIT 软件处理反演到 2005 年 4—11 月的大气可降水量(PWV)资料, 初步分析了河北大气可降水量时空分布特征。结果表明, GPS 反演的大气可降水量具有较高的使用价值, 其时空变化明显, 反映了河北降水的季节和地区变化特征。通过与降水之间关系分析发现, 降水大多出现在高于大气可降水量基值的时段, 不同影响天气系统, 大气可降水量变化具有不同的变化特征。

**关键词:** 大气可降水量 时空分布 降水量

## Weather Diagnostic Analysis of the Precipitable Water Vapor by Ground-based GPS

Chen Xiaolei<sup>1,2</sup> Jing Hua<sup>2</sup> Tong Meiran<sup>2</sup> Fan Junhong<sup>2</sup> Ma Cuiping<sup>3</sup> Li Qingchun<sup>4</sup>

(1. College of Atmosphere Sciences of Lanzhou University, 730000; 2. Hebei Meteorological Observatory;  
3. Hebei Meteorological Science and Technology Service Centre; 4. Institute of Urban Meteorology of Beijing)

**Abstract:** The space-time distribution features of the atmospheric precipitable water vapor over the Hebei province are preliminarily analyzed using the GPS data of Shijiazhuang, Zhangjiakou and Qinhuangdao from Apr. to Nov. 2005, which were processed by GAMIT software. It indicates that the precipitable water changes remarkably with seasons and precipitation mostly occurs in the period when precipitable water is larger than its threshold value. It also suggested that different variation characteristics are correspondent to the different weather systems.

**Key Words:** precipitable water vapor time-space distribution precipitation

## 引 言

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很大进展。所谓 GPS/MET(GPS Meteorology)即 GPS 气象学, 就是指利用全球卫星导航技术(GPS)主动遥感地球大气层, 通过测量穿过大气层的 GPS 信号的延迟来获得大气折射率进而从中得到温、压、湿等信息, 反演出的大气可降水量在气象领域得到了广泛的应用<sup>[1-2]</sup>。

## 1 地基 GPS 遥测大气可降水量基本原理

GPS 卫星发射的 L 波段无线电波信号在穿过大气层时, 受到电离层电子和平流层、对流层大气的折射, 由于速度的减弱和路径的弯曲, 从而造成信号的延迟。大气延迟量可分为电离层延迟、静力延迟和湿延迟, 电离层延迟、静力延迟分别通过双频技术、地面气象要素订正可得出, 最终通过得到的湿延迟可以解算出精确的大气可降水量<sup>[3-4]</sup>。

## 2 地基 GPS 遥测大气可降水量处理流程

### 2.1 地基 GPS 资料处理软件 GAMIT

河北省实时地基 GPS 水汽监测处理软件使用的是 GAMIT 软件, GAMIT 软件由美国麻省理工学院与加州圣迭戈 Scripps 海洋研究所(SIO)共同开发。GAMIT 是运行在 UNIX/LINUX 环境下的高精度的三维定位和定轨软件, 它由不同的模块构成, 来完成数据的预处理、轨道的积分、地心模型中残差和偏导数的计算和最小二乘分析。

### 2.2 地基 GPS 遥测大气可降水量处理流程

一是资料收集。包括卫星星历、数据处

理必需的数据文件(极移、日长变化、日月位置表等)、GPS 观测数据和气象观测数据等。二是数据处理。在资料收集完成后, 就可以使用 GAMIT 软件对资料进行解算, 得到各站点的对流层天顶总延迟, 进而解算出各站点的大气可降水量。

河北省气象局于 2004 年建立的石家庄、秦皇岛、张家口三个 GPS 水汽观测站, GPS 接收机每 30 秒采样一次, 每小时形成一组 GPS 数据, 该数据包括 GPS 导航文件和观测文件, 其中导航文件包括卫星广播轨道、卫星状态信息及电离层和时间信息, 观测文件包括每个历元的卫星观测的双频 C 码和 P 码伪距以及相位。导航文件和观测文件经压缩后传到省气象台信息中心 GPS 处理服务器, 匹配 3 个站的每小时气象资料(气温、气压和湿度)通过 GAMIT 软件对原始数据解算, 最终反演出大气可降水量 PWV。

## 3 河北 GPS/PWV 的时间变化特征

### 3.1 月平均 GPS/PWV 的分布特征

表 1 是 2005 年石家庄、张家口、秦皇岛 3 站 4—11 月月平均 PWV 值。由表 1 可见, 4—11 月石家庄、张家口、秦皇岛 3 站的月平均 PWV 值变化的总趋势一致, 从 4 月到 7 月 PWV 是逐渐增加, 到 8 月略有下降, 9 月、10 月明显下降, 11 月小幅下降。3 站中均是 7 月平均 PWV 值最大, 11 月 PWV 值最小。

### 3.2 日平均 GPS/PWV 的变化特征

图 1a、b、c 分别是 2005 年石家庄、张家口、秦皇岛 3 站 4—11 月 PWV 逐日日平均变化图。由图 1a、b、c 可见, 石家庄、张家口、秦皇岛 3 站从 5 月到 8 月上旬 PWV 值均有波动的上升, 特别是 6 月下旬和 7 月中旬有两次明显的快速上升; 8 月中旬有一次明显的快速下降, 8 月下旬的平均 PWV 值比 8 月上旬平均 PWV

值明显偏低。这些特征表明了河北 6 月下旬 入汛、7 月中旬进入主汛的气候特征。

表 1 2005 年石家庄、张家口、秦皇岛 3 站 4—11 月月平均 PWV 值

站名	纬度	经度	海拔高度 /m	月平均可降水量/mm							
				4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月
石家庄	38°20'N	114°25'E	81.2	10.6	21.4	31.0	43.7	39.5	28.4	11.0	8.5
张家口	40°47'N	114°53'E	725.8	7.2	15.4	22.3	30.2	30.0	18.3	7.6	7.1
秦皇岛	39°56'N	119°36'E	3.3	11.6	21.8	31.7	39.9	39.8	23.1	9.1	8.3

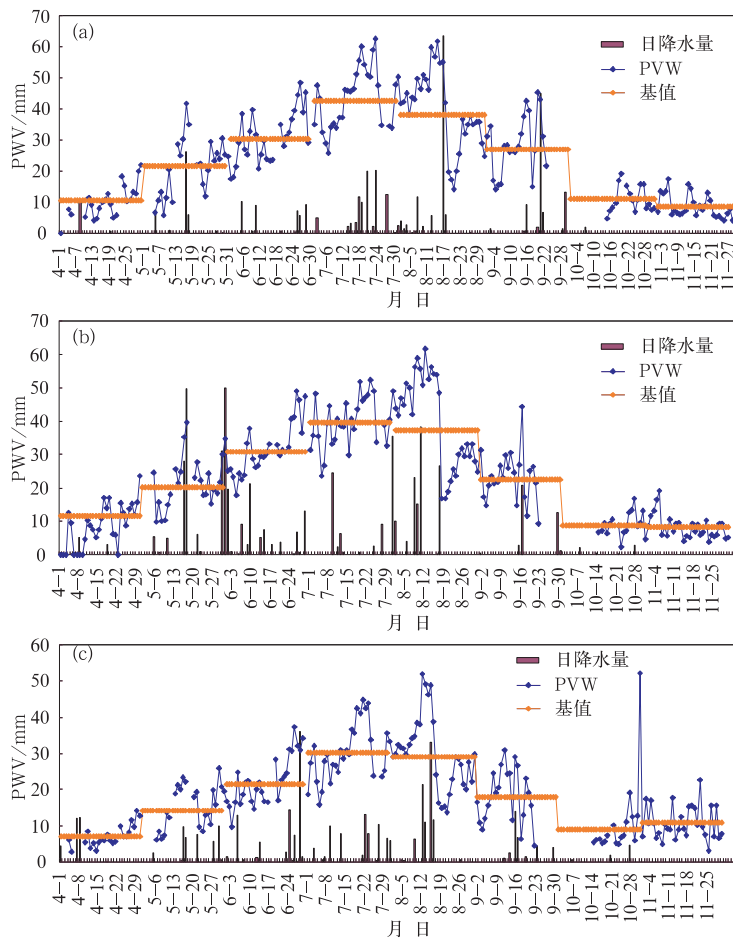


图 1 2005 年 4—11 月石家庄(a)秦皇岛(b)张家口(c) PWV 逐日变化图

### 3.3 GPS/PWV 大气降水量的日变化特征

通过分析石家庄、张家口、秦皇岛 3 站 4—11 月每日不同时刻 PWV 值分布, PWV 有小幅波动, 但日变化较小, 不超过 5mm。

## 4 GPS/PWV 与降水关系

### 4.1 PWV 降水基准值(基值)

曹云昌等<sup>[5]</sup>在研究中采用 2h GPS 遥感

的大气可降水量增量为 5mm 作为阈值,得出在大气可降水量迅速增加后 4h 内出现降水。如果将每月非降水时段的 PWV 平均值作为每月 PWV 降水基值(见表 2),据统计,石家庄 2005 年 4—11 月降水时段均出现在 PWV 值高于基值的时刻。说明小于 PWV

基值时降水概率较低。

对张家口和秦皇岛两站资料分析,90% 以上的降水都出现在大于 PWV 基值的时段,基值指示意义较好。但 6 月和 7 月基值指示意义相对较差,特别是 6 月有 20%~30% 的降水出现在小于基值的时段。

表 2 石家庄、张家口、秦皇岛 3 站 2005 年 4—11 月 PWV 降水基值(单位:mm)

站名	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月
石家庄	10.45	21.53	30.23	42.61	38.0	26.98	11.20	8.67
张家口	7.15	14.25	21.41	30.12	29.04	18.01	8.87	11.07
秦皇岛	11.56	20.17	30.77	39.74	37.30	22.58	8.70	8.25

进一步分析表明,张家口 6 月 PWV 小于基值但有降水的 10 个时段,有 8 个时段在上旬,2 个时段在中旬;秦皇岛 6 月 PWV 小于基值但有降水的 12 个时段,有 6 个时段在上旬,6 个时段在中旬,即均集中在 6 月中上旬。分析其原因,主要是因为 6 月为河北省北部地区春季向夏季过渡的月份。若 6 月基值分旬计算,小于基值有降水的时段,张家口、秦皇岛均降低为 6 个,分别占总时段的 12.5% 和 13.3%,可见在春夏过渡月份基值的计算以旬为单位较以月为单位计算效果要好。

7 月为河北省的盛夏,其平均 PWV 值在全年最高,高水汽条件时,外界较小扰动就易引发降水,故单以大气水汽为条件预测降水效果较差。详细分析张家口 7 月 PWV 小于基值但有降水的 3 个时段均出现在上旬,秦皇岛 7 月 PWV 小于基值但有降水的 6 个时段,2 个时段在上旬,4 个时段在中旬,且在中旬的 4 个时段的 PWV 值与基值差均小于 1mm,即与基值非常接近,故在高 PWV 值月份时段,当 PWV 变化接近基值时就有产生降水可能。

#### 4.2 不同影响天气系统产生降水的 PWV 变化特征

2005 年 4—11 月 PWV 资料完整的石家庄、张家口、秦皇岛 3 站分别有 44、44、32 个

雨日。造成降水的主要影响天气系统有西来槽、高空冷涡、副高外围西南气流等。对上述三种天气系统产生降水的 PWV 变化进行分析,发现有如下特征。

对于明显西来槽系统,降雨前 PWV 有一个从相对低值逐渐升到高值的“爬高”过程,之后在相对高值小幅度摆动一段时间后产生降水。在爬高和高位浮动过程中有 2~3h 的急升阶段。急升幅度为 5~10mm。若急升在爬高期,高位浮动时间相对长一些;若在高位浮动期,则一般急升后即产生降雨,雨停后 PWV 有明显的急降过程(图 2)。若西来槽较弱,降水时间较短,雨量多为小雨时, PWV 变化的趋势与明显的西来槽影响 PWV 变化趋势相似,只是变化幅度、上升所需时间均略小。

高空冷涡产生的降水为辐合型降水,降水量分布很不均匀。其 PWV 变化特征为降雨前期的增值时间较短,增值幅度也较缓,若有 1~2h 急增 8~10mm 的增幅,常常有降水强度大于  $10\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$  的较强降水。雨停前后 PWV 的变化特征也不明显,常常是只有小幅度的下降,之后又缓慢上升,为再次受冷涡影响产生降水积聚水汽;若降雨后又明显的急降,且降到该站本月 PWV 基值之下,则冷涡影响再造成降水的可能性较小(图 3)。

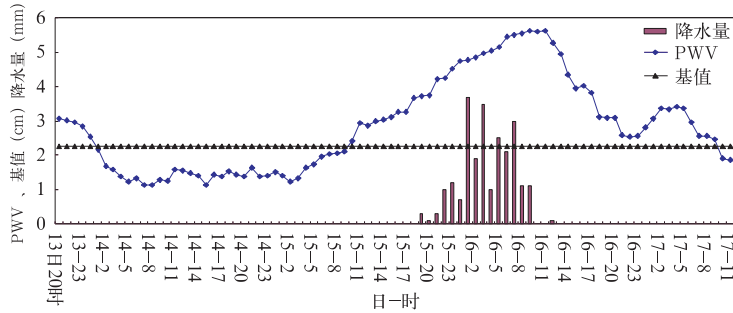


图 2 2005 年 9 月 15—16 日秦皇岛受西来槽影响降水过程 PWV 变化

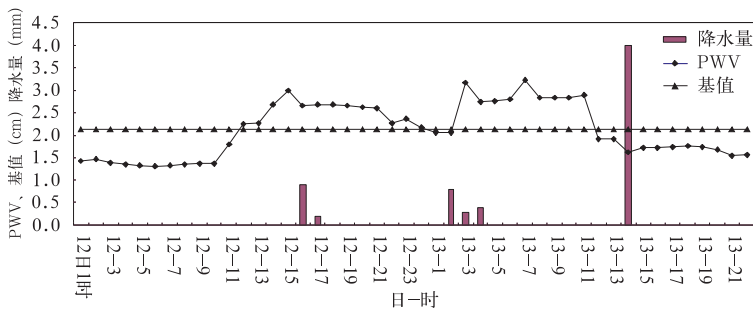


图 3 2005 年 6 月 12—13 日张家口受高空冷涡影响降水过程 PWV 变化

副高外围西南暖湿气流影响时,其降水产生在高于该站本月 PWV 基值近 20mm 的高位 PWV 的波动中,雨前有一天以上较长时间在平稳上升,雨后也没有 PWV 值急降现象,这与副高外围西南暖湿气流输送较强是一致的。

2006 年通过对几次天气个例分析,得出结论与以上基本是一致的。

### 4.3 PWV 变化与降水开始、结束时间的关系

姚建群等<sup>[6]</sup>在一次个例分析中发现 PWV 第一次达到及最后一次出现 50mm 的时间与实际降水开始、结束有着较好的对应关系。通过对 2005 年盛汛期(7 月下旬 8 月上旬)石家庄、张家口、秦皇岛 3 站 PWV 变化发现 PWV 变化与降水开始没有简单的一一对应关系,但是大部分过程在降水前 24h 之内 PWV 值有在 1~3h 增长 4~5mm 以上的急升过程现象出现。

在 7 月下旬至 8 月上旬河北盛汛期,3 站有急升现象的降水次数占该时段各站总降水次数 60% 以上,其中石家庄站最高。急升距降水开始时间均在 6h 以内。急升的幅度,张家口最小,距降水开始时间也较长;石家庄幅度大,距降水开始时间最短,降水突发性大(表 3)。

表 3 2005 年盛汛期(7 月下旬 8 月上旬)PWV 急升情况与降水开始的关系

	急升到降水开始 所需时间/h	最小急升幅度	出现次数占降水总 过程数的百分率
石家庄	1~3	4mm/1~2h	14/19=73.7%
张家口	1~6	3mm/1~3h	6/9=66.7%
秦皇岛	1~6	4mm/1~2h	4/6=66.7%

非盛汛期,3 站有 PWV 急升现象的降水次数占该时段各站总降水次数 60% 以上,其中石家庄和秦皇岛站达到或超过 80%。急升现象距降水开始时间有两种情况,一种是距降水开始时间长(即高位振荡时间长),

急升幅度相对大,此种情况 3 站均在 50% 以上,这时降水天气的影响系统多为深厚的西风槽、高空低涡等,降水时间也较长,突发性小;另一种是距降水开始时间短,急升幅度相对小,此种情况 3 站均在 40% 以下,这时降水天气的影响系统多为低空切变、高空浅槽等,降水时间也较短,突发性大。

降水结束时,3 站均有 80% 以上过程,是降水停止后 PWV 持续在高位几小时后,才急降的,而在雨停前急降和雨停后没有急降的情况相对较小,均不超过 20%。

分析发现,1h 降水量与 PWV 增幅和 PWV 最大值的关系并不明显。但过程总雨量与 PWV 上升所用时间、上升幅度以及相对高位值与该站本月降水 PWV 基值之差有一定关系。

在连续降雨的过程中,一般 PWV 升到高位后,在高位上下波动几个小时后才产生降水。降水过程中,较大的 1h 降水量常出现在 PWV 波动过程中一个相对高点之后。PWV 振荡下降后雨量变小或降水暂停。

## 5 结 论

(1) 通过对 GPS/PWV 月、季时空特征分析发现,PWV 月、季变化特征反映了河北的天气气候特点,特别是 6 月下旬和 7 月中旬

有两次明显上升,表现出河北夏季入汛、主汛期两个阶段的开始。

(2) 利用每月非降水时段 GPS/PWV 大气可降水量平均值作为月降水基值对于降水有一定的指示性,统计发现产生的大多数降水过程 PWV 值要高于当月基值。但在过渡(春夏)转换季节月份以旬为单位计算 PWV 基值效果更好。在主汛期 7 月份 PWV 接近基值时就容易产生降水,如果根据不同影响天气系统进行分析效果更好。

(3) 大部分降水过程前 24h 之内 PWV 值有在 1~3h 内增长 4~5mm 以上的急升出现,可以做为降水预测的指标之一。

## 参考文献

- [1] 曹云昌,方宗义,夏青. 中国地基 GPS 气象应用站网建设[J]. 气象,2006,32(11):42-47.
- [2] 丁金才,叶其欣,马晓星,等. 区域 GPS 气象网站点合理布设的几点依据[J]. 气象,2006,32(2):34-39.
- [3] 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.
- [4] 陈小雷,马翠平. GPS 遥测大气可降水量原理与方法[J]. 河北气象,2005,24(4):37-38.
- [5] 曹云昌,方宗义,夏青. GPS 遥感的大气可降水与局地降水关系的初步分析[J]. 应用气象学报,2005,16(1):54-59.
- [6] 姚建群,丁金才,王坚捍,等. 用 GPS 可降水量资料对一次大一暴雨过程的分析[J]. 气象,2005,31(4):48-52.