

GPS 遥感大气可降水量在暴雨天气 过程分析中的应用

李青春 张朝林 楚艳丽 张京江

(中国气象局北京城市气象研究所,100089)

提 要: 利用北京市气象局地基 GPS 监测试验网遥感大气可降水量(PWV)数据,分析 2004 年汛期暴雨天气过程 PWV 的变化特征及其与降雨量、降雨强度的关系;通过分析地面、高空的位势高度场、风场,以及比湿 q 、水汽通量 Q 及水汽通量散度 A_Q 等物理量诊断场分布,研究天气系统与大尺度水汽输送、辐合的关系,大尺度水汽输送、辐合与 PWV 变化的关系;探讨 GPS 遥感大气水汽资料在预报强降雨天气过程中的应用。得出:PWV 的增长方式受当地天气系统的支配和制约,对于明显降雨过程,当地面、高空天气系统有利于暖湿空气的输送时,在北京附近形成等湿度线密集区, PWV 逐渐增长(降雨开始前的 13~24h)的趋势;当地面、高空有辐合系统东移或生成,或有中小尺度天气系统影响时, PWV 显著增长(降雨开始前的 3~4h);当 PWV 大于某阈值后出现较强降雨, PWV 值及增量的大小与降雨量的大小没有明显的关系。

关键词: 大气可降水量 降雨量 水汽输送

Applications of Precipitable Water Vapor Monitored by Ground-Based GPS to Analyzing Heavy Rain Event

Li Qingchun Zhang Chaolin Chu Yanli Zhang Jingjiang

(Beijing Institute of Urban Meteorology, CMA, 100089)

Abstract: Based on the Monitored data of the GPS network in Beijing, the relationship between the variation characteristics of precipitable water vapor (PWV) in the rainstorm event during 2004 flood season and its rainfall and intensity was analyzed. The results show that the increase of

国家科技部政府间中美合作项目“全球定位系统单双频地基 GPS 水汽遥测技术研究”(H020620250330),中国气象局课题“京津冀地区水汽观测资料应用研究”共同资助。

注:文中所标注的时间均为世界时(UTC)。

收稿日期:2006 年 8 月 8 日; 修定稿日期:2007 年 4 月 2 日

PWV was often restricted by the local weather system, when weather system in ground and upper air picture make for the transportation of warm and moisture air, isohume denseness section was formed nearby Beijing, the *PWV* was increasing during 13-14 hours before rainstorm appearance; when there was convergence system moving eastward or mesoscale weather system forming, *PWV* increased significantly during 3-4 hours before rainstorm, heavy rain appeared after value of *PWV* above threshold, but the value of *PWV* and increment did not correspond to the rainfall.

Key Words: Precipitable Water Vapor (*PWV*) rainfall water vapour transportation

引 言

地基 GPS 遥感大气水汽是 20 世纪末开始发展起来的一种全新的大气水汽探测手段。大气水汽是产生各种天气的重要参数,它的时空分布以及由其相变所产生的巨大潜热,影响着大气的垂直稳定性和天气系统的结构和演变,会造成强烈的对流天气以致产生暴雨。地基 GPS 水汽遥感技术可提供常规气象观测资料无法提供的全天候、高精度、高时效的大气水汽资料,它的应用将为改善天气预报尤其是中尺度天气预报(强对流天气预报和强降雨预报)提供重要的、较为理想的大气水汽资料。

目前,地基 GPS 遥感大气水汽资料的应用研究主要为:应用于中尺度数值模式的三维变分同化,与其他大气监测资料相结合,能较好地改善数值模式初值与分析的质量,对提高短期数值预报的降雨预报准确率有明显作用^[1-3];应用于区域空中水资源的评估,指导人工增雨作业;应用于研究大气总水汽含量(大气可降水量)的变化与降雨量的关系等。针对大气总水汽量(大气可降水量)的时空变化,及其与降雨的关系的研究主要有:李廷兴等^[4]在广东汕头对 *PWV* 与降雨量的关系研究中发现,*PWV* 的高值时段与降雨过程高度相关,*PWV* 在数值上超过基准值以

后,才具备降雨条件。梁丰等^[5]在对北京地区的大气总水汽量与降雨的关系研究中发现,大气总水汽量短时间内的快速增加往往对应有降雨过程出现,但总水汽量的大小与降雨量之间并没有明显的相关。曹云昌等^[6]的研究也表明,降雨量与 *PWV* 的激增存在较好的联系。另外,杨红梅等^[7]在华南暴雨试验期间,通过对大气总水汽量的增减变化特征及增湿方式分析发现:大气总水汽量会以缓增、激增和稳定持续的方式变化,并具有阶段性变化特征。这种阶段性通常受尺度不同的天气系统影响,并与冷空气活动、季风的强弱有密切的关系。分析大气总水汽量的时空变化,研究大气总水汽量(大气可降水量)与降雨的关系,探讨 GPS 遥感大气水汽数据在降雨预报中的应用研究,为降雨天气预报提供重要的方法,具有十分重要的实际意义。

1 资料与方法

利用北京市气象局 2001—2004 年受北京市科委重大科研项目“北京地区地基 GPS 遥感大气水汽应用研究”、国家科技部政府间中美合作项目“全球定位系统单双频地基 GPS 水汽遥测技术研究”联合资助,在北京地区的强天气主要水汽通道房山区组建的单、双频地基 GPS 监测试验网^[8],利用实时监测数据,通过 Burmese 软件解算出时间间

隔为 30 分钟的大气总延迟量,计算大气可降水量 (Precipitable Water Vapor, 缩写为 PWV)。北京房山区地基 GPS 站点分别为琉璃河、窦店、韩村河、青龙湖、窑上、闫村、水管站、官道、房山雨量站。对北京房山区地基 GPS 站网的 PWV 的变化曲线的分析表明,各单频、双频站遥感的 PWV 的变化趋势基本一致,考虑闫村站和官道站与房山雨量站的距离最近,经过对两站的有效数据的比较,选取官道站的大气可降水量进行分析(以下简称 $PWV_{\text{官}}$)。

在分析天气系统和大尺度水汽输送、辐合时,利用北京大学物理学院大气科学系研制的客观分析诊断图形系统^[9],插值选用 Cressman 逐步订正法,地图投影选用双标准兰勃托正形投影,中心点为 40°N 、 115°E ,格点数为 47×35 ,网格距 30km。分析地面、高空的天气形势和风场,计算比湿 q 、水汽通量 Q 、水汽通量散度 A_Q 等物理量场。

$$q = \frac{622e}{p - e} \quad (1)$$

$$Q = \frac{1}{g}q(u^2 + v^2)^{1/2} \quad (2)$$

$$A_Q = \frac{\partial Q_x}{\partial x} + \frac{\partial Q_y}{\partial y} \quad (3)$$

式中的 q 单位是 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$, Q 单位是 $\text{g} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$, g 单位是 $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$, u 、 v 是 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$, ∂x 、 ∂y 是 cm , A_Q 单位是 $\text{g} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

2 强降雨天气过程中 GPS 遥感大气降水量的变化特征

2004 年 7 月 10 日下午至前半夜北京地区出现暴雨天气过程,从北京地区 7 月 10 日 06 至 12 时(UTC,下同)的 6 小时降雨量分布图(见图 1a)上看,降雨大值区包括城区

和城区南部,丰台为降雨中心为 96mm。09—12 时城区平均降雨量超过 50mm,其中天安门降雨量为 87mm、朝阳门 106mm、龙潭湖 81.5mm,到 13 时城区平均降雨量达 73mm,15 时暴雨结束。这次暴雨主要造成城区严重积水、交通中断,以及因城区积水而造成大量平房及楼房地下室进水,引起各界的广泛关注。这次暴雨过程是在有利的大环流背景下产生的,但主要是受局地发展的强对流云团的影响所致^[10],预报难度很大。通过分析使用 GPS 遥感 PWV 数据,可清楚地看到大气水汽的连续变化情况,为暴雨预报提供重要的客观依据。

此次降雨过程房山站处于丰台降雨中心的南部,房山站过程雨量为 35mm。对官道站的 $PWV_{\text{官}}$ 的变化曲线与房山雨量站逐时雨量的比较(见图 2a)分析表明:在降雨前 24 小时的 9 日 08 时开始 $PWV_{\text{官}}$ 开始逐渐增加,10 日 06 时 30 分,也就是在降雨出现的前 2~3 小时 $PWV_{\text{官}}$ 开始明显增加,10 日 09 时开始降雨,10 时 $PWV_{\text{官}}$ 达最大值为 58.5mm,1 小时降雨强度最大为 11.7mm。从整个降雨过程的 $PWV_{\text{官}}$ 的变化看, $PWV_{\text{官}}$ 开始增加时刻到最大时刻的增量为 22.2mm(从 36.3mm 增到 58.5mm),降雨前 3 小时增量为 7.0mm。

2004 年 7 月 28 日夜北京地区出现暴雨天气,主要降雨时段出现在 28 日 18 时至 29 日 03 时。从 7 月 29 日 00 时的 24 小时降雨量分布图上看(见图 1b),降雨量中心在房山、大兴,降雨量为 69mm,另一个降雨中心昌平为 65mm。

对 $PWV_{\text{官}}$ 的变化曲线与房山雨量站的逐时雨量的比较(见图 2b)分析表明:从降雨前 12~13 小时的 28 日 06 时 $PWV_{\text{官}}$ 开始逐渐增加,到降雨前 4 小时的 28 日 12 时

$PWV_{\text{官}}$ 开始明显增加,到 28 日 18 时开始降雨,19 时 1 小时降雨量达最大,为 $23.5\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$,20 时 30 分 $PWV_{\text{官}}$ 达最大为 68.0mm 。从整个降雨过程的 $PWV_{\text{官}}$ 的变化看, $PWV_{\text{官}}$ 开始增加时刻到最大时刻的增量为 24.9mm (从 43.1mm 增到 68.0mm),降雨前 4 小时增量为 9.9mm 。

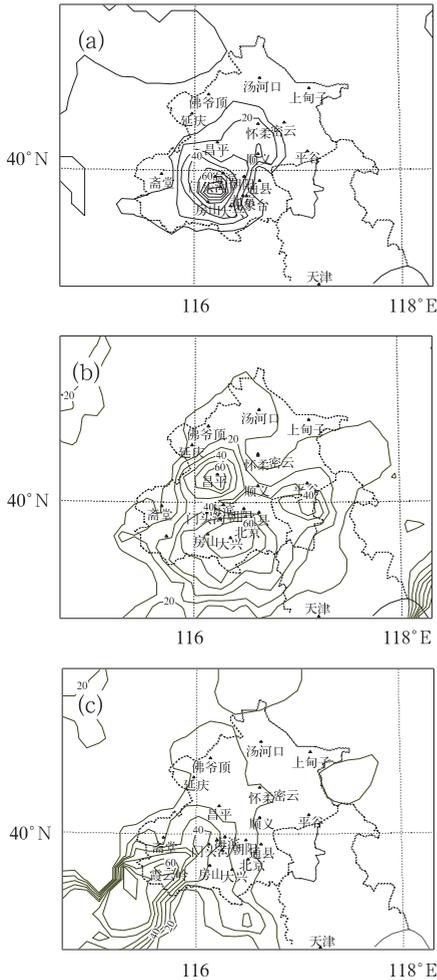


图 1 北京地区降雨量分布

- (a) 2004 年 7 月 10 日 06:00—12:00(UTC)
- (b) 7 月 28 日 13:00—29 日 12:00(UTC)
- (c) 8 月 11 日 13:00—12 日 12:00(UTC)

2004 年 8 月 11 日夜间北京地区出现大雨天气过程,主要降雨时段出现在 11 日 13 时至 12 日 12 时。从 8 月 11 日 00 时 24 小

时降雨量分布图看(见图 1c),降雨量中心在霞云岭达 73mm 。此次降雨过程房山雨量站的过程雨量为 28mm 。

通过对 $PWV_{\text{官}}$ 的变化曲线与房山雨量站的逐时雨量的比较(见图 2c)分析表明:降雨前 4 小时 $PWV_{\text{官}}$ 开始明显增加,到 11 日 15 时开始降雨,17 时 $PWV_{\text{官}}$ 达最大,为 70.6mm ,18 时降雨强度达最大,为 $10.3\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 。从整个降雨过程 $PWV_{\text{官}}$ 的变化看, $PWV_{\text{官}}$ 开始增加时刻到最大时刻的

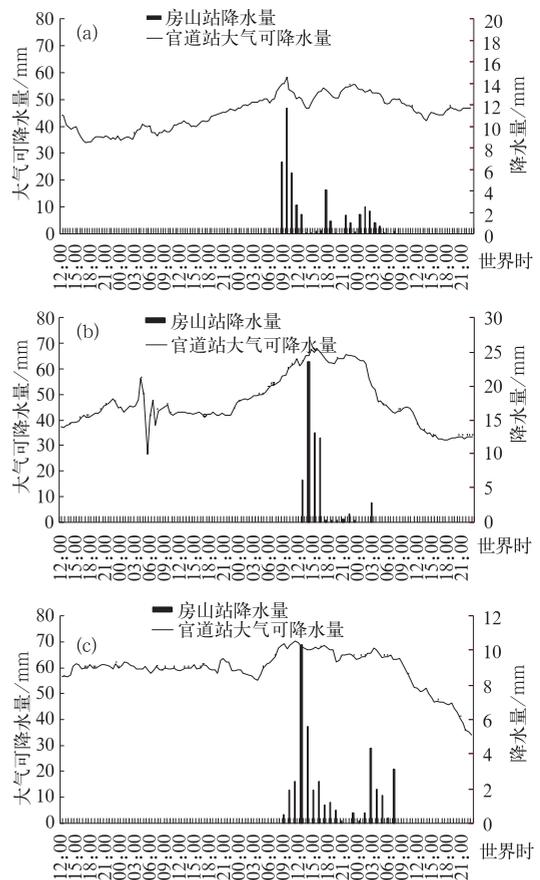


图 2 房山区官道 GPS 站遥感大气可降水量的变化曲线与房山站自记雨量的比较

- (a) 2004 年 7 月 8—11 日, (b) 7 月 27—29 日,
- (c) 8 月 10—12 日

增量为 10.4mm(从 58.9mm 增到 69.3mm), 降雨前 4 小时增量为 11.8mm。

总结以上 3 次降雨过程中的 $PWV_{\text{雨}}$ 的变化特征(见表 1), 在降雨开始前的 13~24 小时, 大气水汽总量在连续增长, 在降雨开始前的几个小时总水汽量快速增长, 当 $PWV_{\text{雨}}$

大于某阈值($\geq 56\text{mm}$)后出现较强降雨。一般情况下当 3~4 小时 $PWV_{\text{雨}}$ 增量大于某阈值($\geq 7.0\text{mm}$), 增量达到最大值, 或者在 0~2.5 小时后出现降雨。 $PWV_{\text{雨}}$ 的量值及增量的大小与降雨量的大小没有明显的关系。

表 1 强降雨 $PWV_{\text{雨}}$ 变化特征值与降雨出现时间、降雨量的关系比较

过程日期	$PWV_{\text{雨}}$ 最大值 /mm	$\Delta(PWV_{\text{雨}})$ 最大值一开始增加 /mm	$\Delta(PWV_{\text{雨}})_{3\sim 4\text{h}}$ /mm	前 3~4h $PWV_{\text{雨}}$ 增量最大值与出现降雨时间间隔/h	过程降雨量 /mm	最大降雨强度 /mm · h ⁻¹
7月10日	58.5	22.2	7.0	0.5	35.0	11.7
7月11日	54.5	20.2	7.7	0	5.8	4.1
7月28日	68.0	24.9	9.9	0.5~2.5	57.1	23.5
8月11日	70.6	10.4	11.8	0.5	28.0	10.3

3 水汽输送与 GPS 遥感大气可降水量变化的关系

3.1 大尺度天气系统与大气水汽输送分析

分析 7 月 10 日下午至前半夜暴雨天气过程的地面、高空各层的天气系统和比湿 q 、风场分布, 从整个过程看, 地面呼和浩特附近有低压, 后发展成为锋面气旋, 北京处于冷锋前部的东南气流中, 有利于东南暖湿空气的输送, 使北京东南部的高湿区北移并使水汽聚集。从 9 日 06 时地面等比湿线分布图上看(见图 3), $q=16\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 线北移到北京, 在北京形成等比湿线密集区。10 日 06 时大湿度中心北移, 09 时开始降雨。高空 850、700hPa 在内蒙古中东部有低涡低槽, 北京处于槽前的偏南气流中, 北京各层均有由西南伸向华北北部的完整湿舌存在(见图 4), 有利于大尺度水汽输送。然后高空低涡低槽辐合系统东移, 几小时后出现降雨。

另外, 分析 7 月 10 日 12 时高空水汽通量 Q 、水汽通量散度 A_Q 的分布图(图 5), 可

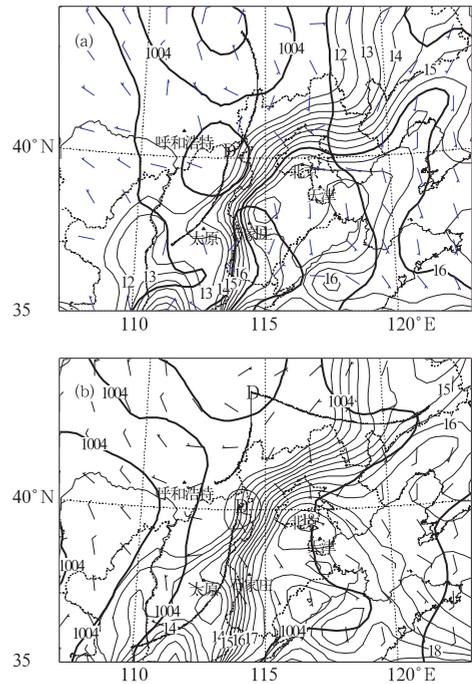


图 3 地面气压 p 、比湿 q 、风场分布图

(a) 2004 年 7 月 10 日 00 时,

(b) 2004 年 7 月 10 日 06 时(UTC)

以看出:10 日 12 时 700hPa 北京处于水汽通量大值区和水汽通量辐合区或辐合中心(A_Q 负值区)。说明中低层为水汽通道, 并且有明

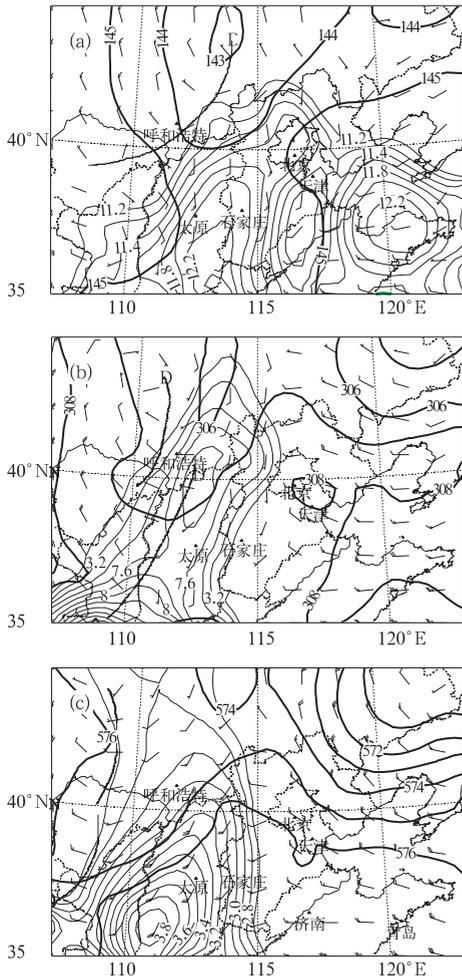
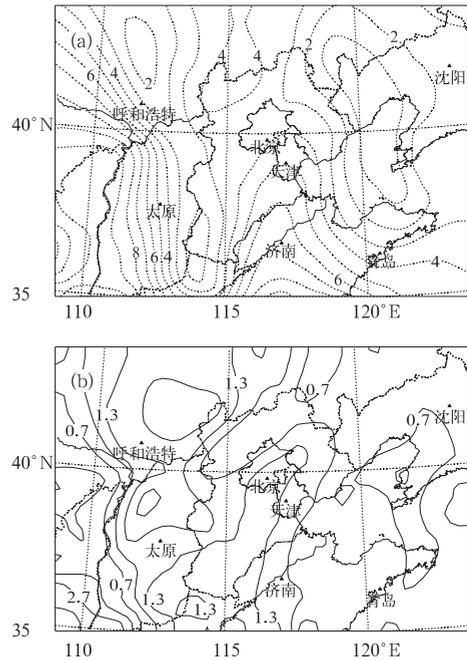


图 4 2004 年 7 月 10 日 00 时(UTC)
850hPa(a)、700hPa(b)、500hPa(c)
位势高度 h 、比湿 q 、风场分布图

显的水汽辐合,有利于强降雨的出现。整个降雨过程的水汽增长既有水汽输送作用也有水汽辐合作用。

分析 7 月 28 日夜间暴雨天气过程的地面、高空各层的天气系统和比湿 q 、风场分布,7 月 28 日 00 时地面北京处于低压辐合带,华北南部有倒槽,等比湿线(q)密集区随锋面的南压移到北京。28 日 06 时北京附近形成东—西向切变线,南部的偏南风北移,12 时大湿度区($q \geq 20 \text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 等比湿线区域)北



5 2004 年 7 月 10 日 12 时(UTC)700hPa
水汽通量 Q (a)和水汽通量散度
 A_Q (b)分布图

移。倒槽向北发展形成气旋(大约在 28 日 18 时)开始降雨。28 日 00 时高空 850hPa 北京处于东北低涡低槽尾部,等比湿线密集区,吹西南风,12 时转吹东南风;28 日 00 时 700、500hPa 处于高空槽前西南气流,吹西南风,有利于水汽输送,500hPa 有湿舌向北伸。12 时 700hPa 北京附近形成等比湿线密集区。另外分析 28 日 00 时的 500、700、850hPa 水汽通量 Q 、水汽通量散度 A_Q 分布图(图略)得出:850hPa 北京处于南南西—北东北方向水汽通道大值区,但有弱水汽辐散。700hPa 位于水汽辐合区或中心。整个降雨过程的水汽增长既有水汽输送作用也有水汽辐合作用。

分析 8 月 11 日夜间大雨天气过程的地面、高空各层的天气系统和比湿 q 、风场分布,8 月 11 日 00 时地面河套有倒槽,出现回

流,吹偏东风,在北京处于等比湿线(比湿 q) 密集区。11日06时倒槽东移,其内部有冷锋生成,11日12时河套倒槽冷锋东移发展,大气水汽激增,11日18时北京出现降雨。在高空850hPa河套有低压,处于等湿度线密集区,吹东南风。另外分析8月11日00时500、700、850hPa水汽通量 Q 、水汽通量散度 A_Q 的分布图(图略),在850、700hPa上处于西南—东北方向水汽通量大值区。在700、500hPa上处于高空槽前西南气流,河套东部—华北西部有明显西南—东北方向湿舌,吹西南风,为水汽辐合区。整个降雨过程的水汽增长主要为水汽辐合的作用。

3.2 水汽输送、辐合与GPS 遥感PWV变化的关系

通过以上分析可以看出,大雨、暴雨以上降雨过程的大气水汽的增长方式受当地天气系统的支配和制约,一种表现为:大尺度水汽输送→天气系统辐合、水汽聚集的过程,而另一种仅仅是天气系统辐合、水汽聚集的过程。以大尺度水汽输送→天气系统辐合、水汽聚集为水汽增长方式的强降雨过程,是有利的大尺度天气系统和中小尺度天气系统的共同影响所造成。在有利的地面、高空天气系统影响下,如,地面北京处于气旋、冷锋、倒槽前部东南或偏东气流控制,有利于东南暖湿空气的输送,大湿度区移到北京,在北京形成等比湿线密集区,与地面相配合高空(850、700hPa)处于低涡低槽前的偏南气流中,湿舌由西南明显北伸,大气水汽持续增加,具体表现为PWV会出现连续增加的现象($\Delta PWV_{\text{官}24\text{h}} \geq 20.0\text{mm}$)。当地面、高空有辐合系统东移或生成,或有中小尺度天气系统影响时,北京处于西南—东北方向水汽通道大值区,并且位于水汽辐合区或中心,具体表

现为在降雨前3~4小时,PWV会出现激增的现象($\Delta PWV_{\text{官}3\sim4\text{h}} \geq 7.0\text{mm}$);以天气系统辐合、水汽聚集为水汽增长方式的强降雨天气过程,可能并不存在大尺度水汽输送,只是在地面、高空有辐合系统东移或生成,或有中小尺度天气系统影响时,产生的水汽辐合和聚集,表现为PWV在降雨前的几个小时出现激增。

4 结 语

建立在强天气主要水汽通道房山区的地基GPS试验网遥感的PWV,能高精度、高时间密度地反映北京地区强降雨过程的大气水汽变化。在降雨开始前的10多小时,甚至在前1天,PWV开始连续增长,在降雨开始前的几个小时总水汽量快速增长,当PWV大于某阈值($PWV_{\text{官}} \geq 56\text{mm}$)后出现较强降雨。一般情况下当3~4小时PWV的增量大于某阈值($\Delta PWV_{\text{官}3\sim4\text{h}} \geq 7.0\text{mm}$),PWV增量达到最大值时,或者在0.5~2.5h后出现降雨。但PWV的量值及增量的大小与降雨量的大小没有明显的关系。

明显降雨天气过程的大气水汽的增长过程主要是大尺度水汽输送→天气系统辐合、水汽聚集的过程,是在有利的地面、高空天气系统影响下,PWV出现连续增加的现象($\Delta PWV_{\text{官}24\text{h}} \geq 20.0\text{mm}$)。当地面、高空有辐合系统东移或生成,或有中小尺度天气系统影响,处于水汽通量大值区(西南—东北方向水汽通道),并且位于水汽辐合区或中心,降雨前3~4小时,PWV会出现激增($\Delta PWV_{\text{官}3\sim4\text{h}} \geq 7.0\text{mm}$);天气系统辐合、水汽聚集的水汽增长方式可能并不存在大尺度水汽输送,只是在地面、高空有辐合系统东移或生成,或有中小尺度天气系统影响时,产生

的水汽辐合和聚集,表现为 PWV 在降雨前的几个小时出现激增。

在大气可降水量应用于降雨天气预报过程中,应与天气系统和风场及湿度场的分布,以及测站的气压、温度、湿度的变化相结合,可为强降雨预报提供有用的信息。另外,GPS 遥感大气可降水量数据在实际天气预报应用过程中,还应分析比较有降雨和无降雨天气的大气降水量的变化特征的差异,针对各种不同天气系统类型分析大气降水量的变化特征,通过分析寻找量化指标,为准确预报天气提供客观方法。

致谢: 徐晓峰副研究员为本文的降雨资料处理提供帮助。

参考文献

- [1] 张朝林、陈敏、Ying-Hwa Kuo,等. “00.7”北京特大暴雨模拟中气象资料同化作用的评估[J]. 气象学报, 2005, 63(6): 922-932.
- [2] 张朝林, 季崇萍, Ying-Hwa Kuo, 等. 地形对“00.7”北京特大暴雨过程影响的数值研究[J]. 自然科学进展, 2005, 15(5): 572-578.
- [3] Zhang Chaolin, Ji chongping, KUO Ying-Hwa, et al. Numerical simulations of topography impacts on “00.7” heavy rainfall in Beijing. Progress in Nature Science. 2005, 15(to be printed).
- [4] 李廷兴, 徐宝祥, 胡新康, 等. 用地基 GPS 观测站遥测大气水汽含量和可降雨量的理论基础与试验结果[J]. 中国科学(A 辑)2002, 30(增刊): 107-110.
- [5] 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可降水量[J]. 大气科学, 2003, 27(2): 236-244.
- [6] 曹云昌, 方宗义, 夏青. GPS 遥感大气可降水量与局地降雨关系的初步分析[J]. 应用气象学报, 2005, 16(1): 54-59.
- [7] 杨红梅, 何平, 徐宝祥. 用 GPS 资料分析华南暴雨的水汽特征[J]. 气象, 2002, 28(5): 10-14.
- [8] 谢璞, 张朝林, 王迎春, 等. 北京地区单双频地基 GPS 大气水汽遥测试验与研究进展[C]. 奥运气象保障技术研究 2004 年度论文汇编. 北京: 气象出版社, 2004: 165-171.
- [9] 郑永光, 王洪庆, 陶阻钰, 等. windows 下二维气象绘图软件——客观分析软件诊断图形系统[J]. 气象, 2002, 28(3): 42-45.
- [10] 肖仁春. ‘7.10’北京地区暴雨天气分析, 推进气象科技创新. 加快气象事业发展[C]. 2004 年中国气象学会年会论文集, 北京.