

文章编号:1004-9045(2008)02-0141-08

## GPS/Pwv 资料在强对流天气系统中的特征分析

叶其欣<sup>1</sup>, 杨露华<sup>2</sup>, 丁金才<sup>2</sup>, 陆滢滢<sup>3</sup>, 徐秀芳<sup>2</sup>, 尹红萍<sup>2</sup>, 朱佳蓉<sup>2</sup>, 刘晓波<sup>2</sup>

(1.上海市卫星遥感与测量应用中心, 上海 201100; 2.上海中心气象台, 上海 200030; 3.南京大学, 南京 210093)

**摘要:**应用 GPS 探测的可降水水汽资料 Pwv 对上海地区 2002~2005 年强对流的水汽变化特征进行了分析。分析表明: 每 30 分钟一次的 GPS/Pwv 资料能直观地、及时地反映大气中水汽的时间变化和空间变化; GPS/Pwv 资料随时间的演变特征与降水有较好的对应关系, 不同的季节及不同的降水类型有着不同的分布特征; GPS/Pwv 的散度资料可以反映大气中水汽的辐合、辐散分布情况。文章还给出了不同季节产生强对流天气的 GPS/Pwv 阈值, 表明 GPS/Pwv 资料在强对流天气预报方面有一定的应用价值。

**关键词:** GPS; 可降水水汽; 阈值; 强对流

**中图分类号:** P407 **文献标识码:** A

### 1 引言

强对流天气产生的一个基本条件是要有充沛的水汽, 目前常规探测资料不能满足对水汽的时间和空间分布的了解。20 世纪 90 年代初才发展起来的地基 GPS 技术为探测大气水汽提供了一个有效的新途径。它利用 GPS 卫星信号的延迟量可反演出的大气可降水量 (GPS/Pwv), 有效地弥补了目前常规观测手段对大气中水汽测量的不足, 可以提高对灾害性天气 (特别是暴雨天气) 的监测和预报能力。

上海市人民政府投资建设的由 14 个 GPS 基准站组成的覆盖整个长江三角洲地区的 GPS 综合应用网已于 2002 年 6 月建成, 并投入了业务使用。它可提供半小时一次长三角地区大气可降水量的资料, 为深入开展地基 GPS 气象学的研究创造了基本条件。

目前国外气象专家在这方面做了很多研究, 如 Liou Y A, Huang C Y<sup>[1]</sup>和 Duan J P, Bevis M, Fang P<sup>[2]</sup>详细介绍了利用 GPS 信号的湿延迟反演大气中天顶方向水汽积分 (PW) 的原理和方法, 并在 1993 年 5 月在美国 Oklahoma 洲和临近地区实施了 30 天的 GPS/STORM 试验, 把 GPS 导出的 PW 和微波辐射计 (WVR) 观测的 PW 进行比较, 得出两者差的均方差小于 0.15 mm。国内有专家在 GPS 气象学的应用方面做了很多工作。丁金才、黄炎、叶其欣等<sup>[3]</sup>利用长江三角洲 GPS 综合应用网反演的 PWV 资料对 2002 年 7 月 Ramasun 台风影响华东沿海期间的水汽变化进行了分

析, 发现台风的降水和 PWV 的变化有很好的对应关系, 台风的螺旋雨带和 PWV 高值区的分布吻合很好。袁招洪、丁金才、陈敏<sup>[4]</sup>进行了 GPS 观测资料应用于中尺度数值预报模式的初步试验, 结果表明, 利用 GPS 测量的可降水量对模式初始湿度场的调整能明显改善模式初始场描述水汽分布的能力, 对模式 6 h 累积雨量预报有明显的改善作用。丁金才、马晓星、叶其欣等<sup>[5]</sup>还利用“长江三角洲 GPS 综合应用网”2002~2006 年四年的资料, 统计出不同季节预报降水发生的 Pwv 阈值。

本文主要应用“长江三角洲 GPS 综合应用网”提供的 2002~2005 年四年的 GPS/Pwv 资料, 对上海地区 4~9 月的强对流过程水汽随时间的变化特征进行了分析探讨, 旨在对今后上海地区强对流预报提供一些有用的参考依据。

### 2 资料来源与计算方法

#### 2.1 GPS/Pwv 资料

选取“长江三角洲 GPS 综合应用网”提供的 GPS 信号所反演的 2002~2005 年 4~9 月可降水水汽 Pwv 资料, 范围为 29°~33°N, 118°~122°E 的长江三角洲地区。计算公式<sup>[6]</sup>为:

$$Pwv = \cdot Zwd \quad (1)$$

式中 Pwv 是大气气柱的总水汽含量转换成等效液态水柱的高度, 为转换因子, Zwd 为天顶湿延迟。

$$= 10^6 [R_v (k_3/T_m + k_2)]^{-1} \quad (2)$$

收稿日期: 2007-11-09; 定稿日期: 2008-02-27

基金项目: 中国气象局推广项目 (CMATG2007M16) 及国家科技部 863 计划 (2006aa12a107) 和世博专项课题 (国家科技部 2005BA908B15、上海市科委 05dz05815) 共同资助

作者简介: 叶其欣, 男, 1951 年生, 高级工程师, 主要从事 GPS 资料的综合应用与开发。Email: yqx48@sina.com

其中,  $R_v=461.495 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$  是水汽的比气体常数,  $k_3$  和  $k_2$  是物理常数,  $k_2=22 \text{ K}\cdot\text{hPa}^{-1}$ ,  $k_3=3.739 \times 10^5 \text{ K}^2\cdot\text{hPa}^{-1}$ ,  $T_m$  是大气的权重平均温度, 可定义为:

$$T_m = \int (e/T) dz / \int (e/T^2) dz \quad (3)$$

其中,  $e$  为水汽压,  $T$  为温度 (K), 积分沿整个气柱。在实际工作中,  $T_m$  可一般可通过地面温度  $T_s$  近似计算, 目前通常使用 Bevis 提出的  $T_m$  近似计算公式<sup>[7]</sup>:

$$T_m = 70.2 + 0.72T_s \quad (4)$$

本研究中所用到的长江三角洲 GPS 综合应用网站点分布见图 1。

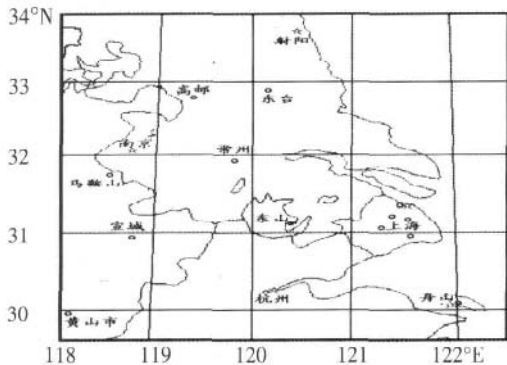


图 1 长江三角洲 GPS 综合应用网站点分布图

### 2.2 探空资料计算的 Pwv

选取上海宝山站 2002~2005 年 4~9 月的探空资料, 水汽的计算公式为:

$$lw = \int v dz \quad (5)$$

式中  $v$  是水汽的密度, 积分由地面到高空进行计

算, 可降水量为:

$$Pw = lw / w \quad (6)$$

式中  $w$  是液态水的密度, 在探空中的每一层水汽压由以下经验公式取得:

$$P_v = P_0 \times 10^{-Z} \quad (7)$$

式中  $P_v$ ,  $P_0$  分别为高度  $Z$  及海平面的水汽压值, 自由大气中  $Z = 1/5000$ , 水汽的密度为:

$$v = P_v / (R_v T) \quad (8)$$

式中  $R_v$ ,  $T$  分别为水汽的气体常数及温度。计算出在探空中的每一层  $v$  值, 通过积分可得到大气的  $Pw$  值。

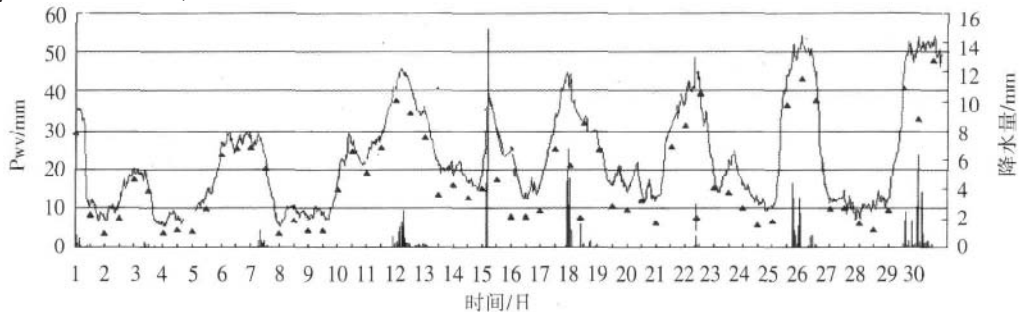
另外, 本文还选取上海宝山站、浦东站、奉贤站 2002~2005 年 4~9 月的每小时降水资料及上海中心气象台强对流历史个例库的资料, 与 GPS/Pw 资料进行对比分析。

### 3 单站 GPS/Pwv 时序资料的应用

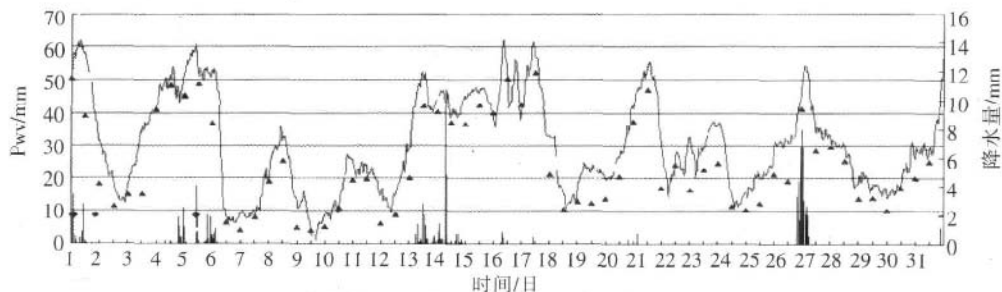
据近 10 年资料统计, 上海地区强对流天气主要以暴雨为最多, 按季节划分又分为春季对流性强降水、梅雨期暴雨、夏季热雷雨和台风暴雨几种类型, 下面分别对这四种强降水的 GPS/Pw 变化特征进行分析探讨。

#### 3.1 春季对流性强降水 GPS/Pwv 变化特征

图 2 为两张典型的春季 4、5 月份 GPS/Pw 时序变化图, 图 2a 是 2004 年 4 月浦东站 GPS/Pw 时序变化图, 图 2b 是 2005 年 5 月奉贤站 GPS/Pw 时序变化图。图中实曲线为 GPS/Pw 测值, 直方柱线条为测站 1 h 雨量, 三角形为探空所得水汽值, 菱形表示上海地区有强对流出现, 圆点表示本站有强对流产生 (图 3~5



(a) 浦东站(2004 年 4 月 1 日 00 时至 4 月 30 日 23 时)



(b) 奉贤站(2005 年 5 月 1 日 00 时至 5 月 31 日 23 时)

图 2 2004 年 4 月浦东站及 2005 年 5 月奉贤站 Pwv 时序图

图例说明类同)。从图中可见,每隔 3~4 d 就有一次降水过程,每一次降水都对应一次 GPS/Pwv 的峰值,春季过程性降水特征在 GPS/Pwv 曲线有着明显的表现。另外,从图中可见 4 月份出现降水的 GPS/Pwv 阈值 > 20 mm, 出现强对流天气的 GPS/Pwv 阈值 > 40 mm, 5 月份出现降水的 GPS/Pwv 阈值 > 35 mm, 出现强对流天气的 GPS/Pwv 阈值 > 55 mm, 即出现强对流天气的 GPS/Pwv 阈值要高于出现一般降水天气 20 mm。并且 5 月份的阈值要高于 4 月份的阈值。但是从图中也看到 GPS/Pwv 测值达到强对流阈值的,并不一定都出现强对流天气,伪警率较高,这是因为水汽条件是强对流天气产生的必要条件,但不是唯一条件,如果不具备触发启动机制及不稳定层结,那么还是有可能不产生强对流天气的。另外还可能是产生连续性降水,但达不到 1 h 雨量 20 mm 的短时强降水标准。如图 2a 中的 2004 年 4 月 30 日(注:4 月 30 日宝山 1 h 雨量为 16 mm)及图 2b 中的 2005 年 5 月 27 日(注:5 月 27 日奉贤 6 h 雨量达 35 mm)这两次过程。

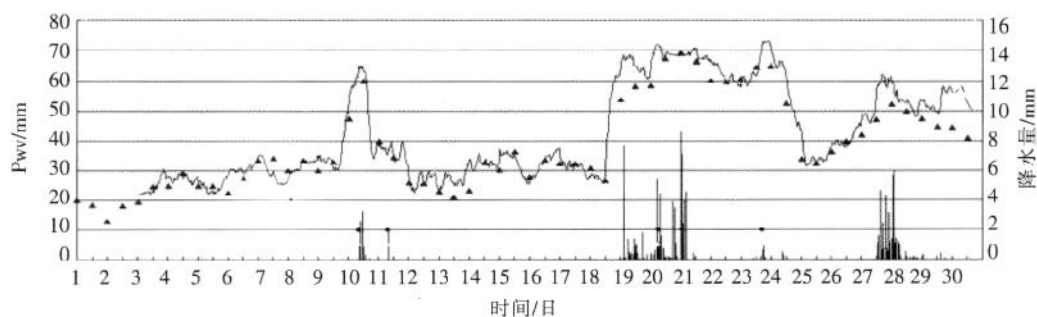
### 3.2 梅雨期 GPS/Pwv 变化特征

图 3a 是 2002 年 6 月奉贤站 GPS/Pwv 时序变化图,从图上可见 6 月 18 日前 GPS/Pwv 均值在 30 mm 左右,6 月 10 日、6 月 11 日出现了两次强对流天气,相应 GPS/Pwv 也出现了 65 mm 及 40 mm 两个峰值,

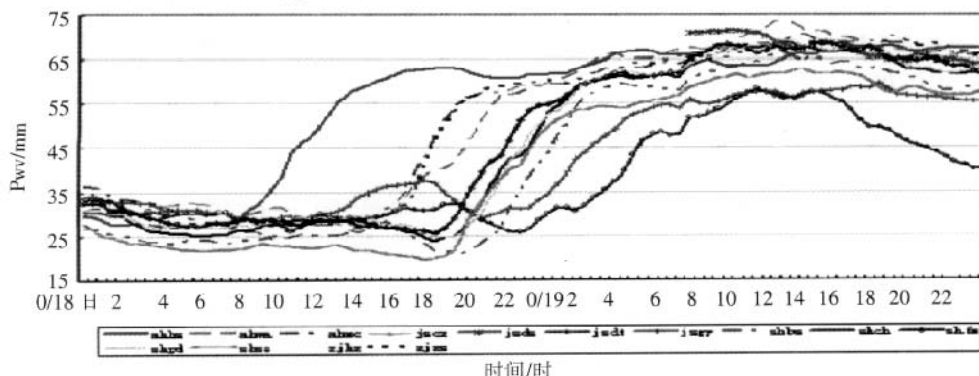
而从 6 月 18 日夜间开始, GPS/Pwv 值有一个突升,从 26 mm 剧增到 62 mm,并一直到 25 日前, GPS/Pwv 值在 60~70 mm 之间高值震荡。从图上可见,6 月 18 日前五天 GPS/Pwv 均值在 30 mm,后五天 GPS/Pwv 均值在 65 mm,说明 18 日夜间开始,大气系统出现了一个季节性的转换。

图 3b 是 2002 年 6 月 18、19 日长三角 GPS 综合应用网 14 站的 GPS/Pwv 时序变化图,同样,由图中可见,从 6 月 18 日中午 11 时开始各站 GPS/Pwv 的值开始剧增,长江三角洲地区自西向东、由南向北的在短短的 12 h 内 GPS/Pwv 值从 30 mm 左右升到了 60 mm 左右,而且此后很长一段时间内 GPS/Pwv 值都保持在高值震荡。安徽黄山站 6 月 18 日 08~18 时 10 h 内 Pwv 值从 30 mm 剧增到 63 mm,浙江杭州站 6 月 18 日 20 时到 19 日 02 时短短 6 h Pwv 值从 23 mm 剧增到 53 mm,而江苏东台站则 6 月 19 日 00~12 时的 12 h 内 Pwv 值从 25 mm 剧增到 55 mm。由此可见,2002 年 6 月 18 日起,长三角地区进入了梅雨季节。

综上所述,应用 GPS/Pwv 时序图可以作为诊断入梅时间的一种较好方法<sup>[9]</sup>。另外,从图上可见,梅雨期降水的 GPS/Pwv 阈值 > 50 mm, 梅雨期强对流降水的 GPS/Pwv 阈值 > 60 mm。



(a) 奉贤站(2002 年 6 月 1 日 00 时至 6 月 30 日 23 时)



(b) 2002 年 6 月 18、19 日长三角地区各 GPS 站点 Pwv 时序图

图 3 2002 年 6 月奉贤站及 2002 年 6 月 18、19 两日长三角地区各 GPS 站点 Pwv 时序图

### 3.3 盛夏期热对流降水的 GPS/Pwv 变化特征

8 月份上海进入盛夏期,同时也是热雷雨、强对流

天气频发的季节。图 4a 是 2002 年 8 月浦东站的 GPS/Pwv 时序图,由图可见,有两段多雨期(6~18 日、23~30

日), 两段无雨期(2-5 日, 19-22 日)。多雨期的 GPS/Pw 均值 47 mm, 无雨期的 GPS/Pw 均值 < 47 mm。并且每一次降水都对应着一个峰值, 同时大多伴随着强对流天气的产生。统计结果表明, 8 月份 GPS/Pw 降水的阈值为 47 mm, 强对流的阈值为 50 mm, 相差无几。因此, 在这一阶段, 降水多为热雷雨产生的短时强降水(除台风产生的降水外), 因此在实际预报过程中, 考虑有降水的产生时可同时考虑有强对流天气产生。

图 4b 是 2004 年 8 月奉贤站的 GPS/Pw 时序图, 在图上可见, 8 月 4 日、16 日、25 日这三天, 奉贤本站无

降水产生, 但上海的局部地区出现了强对流(8 月 4 日 13 时宝山月浦和青浦重固出现了局地热雷雨, 1 h 雨量 > 30 mm, 8 月 16 日 15 时嘉定黄渡出现了龙卷, 8 月 25 日 04 时奉贤四团出现了龙卷)。尽管这三次过程范围都很小, 时间也很短, 属于中尺度的局地强对流天气, 但在 GPS/Pw 时序图上却都有较明显的反映, 分别都对应着一个峰值。8 月 4 日 GPS/Pw 值从 46 mm 突升到 59 mm, 8 月 16 日、25 日的 GPS/Pw 值也分别达到了 56 mm 和 59 mm(见图 4b)。由此可见, GPS/Pw 资料在强对流天气预报方面也有较好的应用价值。

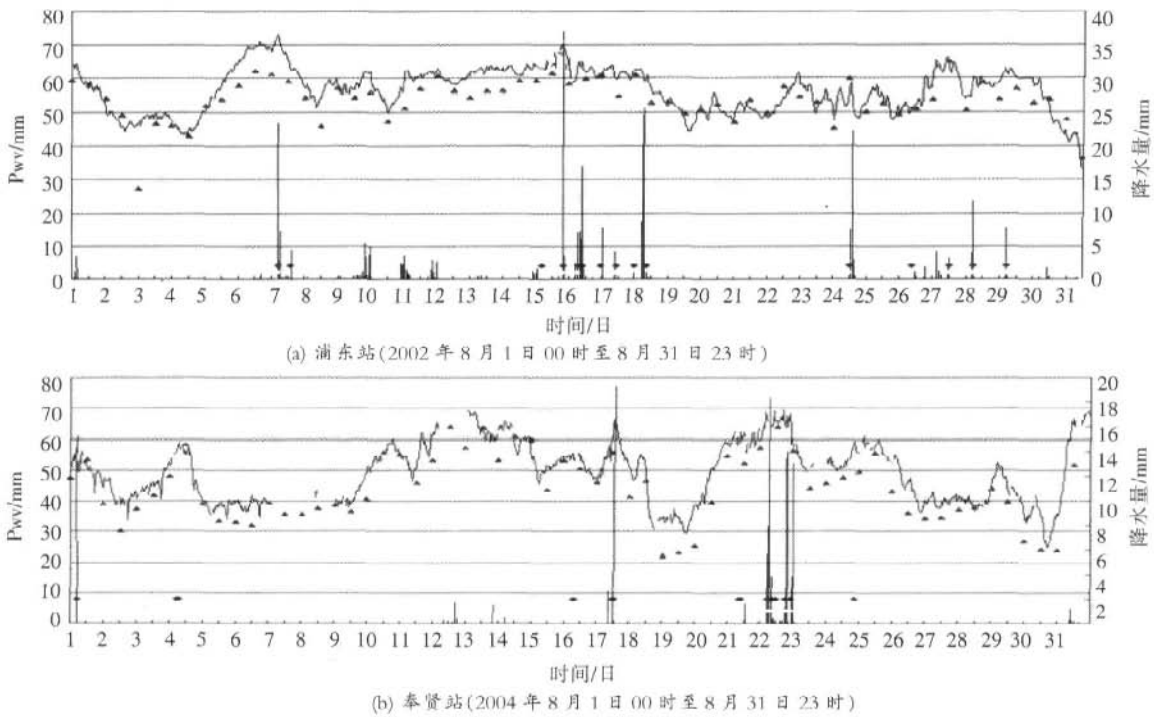


图 4 浦东站和奉贤站 8 月 Pwv 时序图

### 3.4 台风降水的 GPS/Pwv 变化特征

#### 3.4.1 台风本体影响的降水 GPS/Pwv 变化特征

图 5a 是 2005 年 8 月浦东站的 GPS/Pw 时序图, 图中 8 月 5-7 日的降水是“麦莎”台风造成的。从图中可见, 8 月 4 日 08 时 GPS/Pw 还处于 32 mm 的波谷, 以后 GPS/Pw 开始急升, 20 时上升至 68 mm, 一直到 5 日 08 时, GPS/Pw 维持在 60 mm 这样一个高值附近震荡, 说明水汽开始聚集上升, 但这时还没出现降水, 对应卫星云图上, 台风外围的第一条云带掠过上海。5 日白天 GPS/Pw 曲线又有一次短暂的回落, 对应卫星云图上, 本地正好处于两条云带间隙的无云区, 5 日 20 时 GPS/Pw 再一次急升到 65 mm, 6 日 20 时 GPS/Pw 达到了极大值 80 mm, 强降水出现在第二个波峰开始时, 6 日夜里风雨达到了最强, 6 h 雨量普遍超过 100 mm。8 日 08 时 GPS/Pw 从 70 mm 急降到 55 mm, 此次降水也就结束了。

同样, 从图 5b(2005 年 9 月奉贤站的 GPS/Pw 时序图)上, 也可看到类似的台风本体影响的降水的 GPS/Pw 曲线的表现特征。图中 9 月 11-12 日是 0515 号台风“卡努”的影响阶段, 从图中可见, 9 月 10 日 20 时 GPS/Pw 值还处于 30 mm 的波谷, 以后开始陡升, 11 日 02 时上升到了 68 mm, 以后维持在这附近震荡, 11 日 23 时 GPS/Pw 再次上冲到 82 mm, 这时奉贤出现了 1 h 雨量 > 50 mm 的强降水。12 日 08 时 GPS/Pw 开始突降, 降水也就停止了。

#### 3.4.2 台风外围雨带影响的降水 GPS/Pwv 变化特征

图 5b 中的 2005 年 9 月 2-4 日及图 4b 中的 2004 年 8 月 12-14 日这两段时间, 对应着 0513 号台风“泰利”和 0414 号台风“云娜”的外围云系影响期, 图中可以看到, 降水也是出现在第二个波峰开始时, 但 GPS/Pw 峰值要小于台风本体影响时的 GPS/Pw 峰值。另外, 从图中可见, 尽管 GPS/Pw 值升得较高(60-70

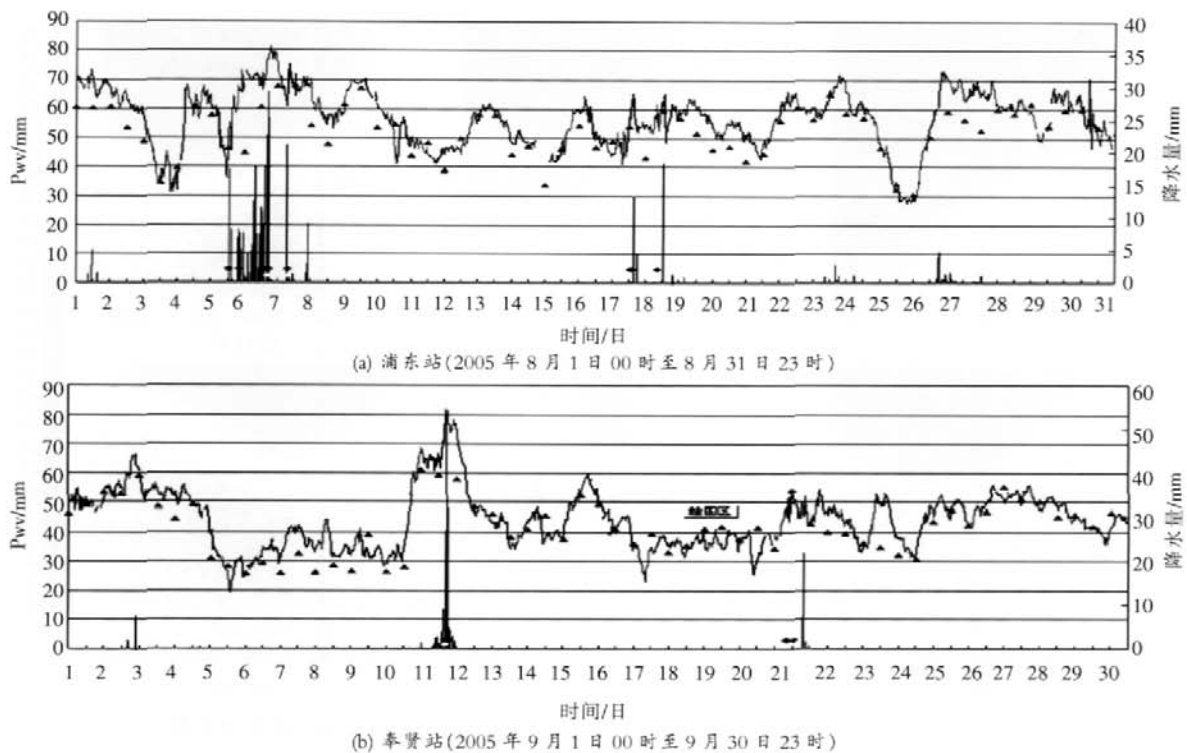


图 5 2005 年 8 月浦东站和 2005 年 9 月奉贤站 Pwv 时序图

mm), 达到了强对流降水的阈值, 但实况没有出现强对流, 仅仅下了小阵雨。这说明在台风外围云系影响时, 水汽较充沛, 但无冷空气结合, 降水不会太大。因此, 不能单靠 GPS/Pwv 值来判断降水的大小和强对流的产生, 还要结合天气形势和气象卫星云图、多普勒天气雷达等气象资料来进行综合判断分析。

### 3.5 统计结果与阈值的设定

表 1 是丁金才等人<sup>[9]</sup>2005 做的一部分研究结果。该表统计了 2002~2004 年 3 年的 GPS/Pwv 资料, 设定了上海地区 3~9 月产生降水的 GPS/Pwv 阈值。从表中可以看到临界成功指数 (CSI) 还是较高的, 达到 0.72 以上, 击中率达到 0.86 以上。表 2 是应用 2002~2005 年的 GPS/Pwv 资料、强对流个例资料及每小时雨量资料做的一个统计结果。

对照表 1 和表 2, 可以看到, GPS/Pwv 的强对流天气预报阈值要比降水预报阈值来得高, 并且随着季节的不同, 两者之间的差值也不同。4 月份差值最大, 达到 23 mm, 7、8 月份差值最小, 仅仅只有 3 mm。从临界成功指数 (CSI) 来看, 夏季 6、7、8 月份较好, 达到 0.65 以上。另外, 从表 2 中可见, 漏报次数很少, 空报次数较多, 因此, 击中率 (POD) 较高, 同时伪警率 (FAR) 也较高, 特别是在春季 4、5 月份。因此, 这再一次证实了 GPS/Pwv 资料在强对流天气预报方面有一定的参考价值, 但必须结合天气形势和其它气象资料进行综合分析和判断。

表 1 应用 2002~2004 年 GPS/Pwv 资料预报上海地区降水情况

月份	降水阈值 (mm)	达到阈值次数	降水总次数	报准次数	漏报次数	空报次数	CSI	POD	FAR
3、4	20	165	150	144	6	21	0.842	0.960	0.127
5	37	62	59	53	6	9	0.779	0.898	0.145
6、9	45	60	57	49	8	11	0.721	0.860	0.183
7、8	47	147	136	136	0	21	0.866	1.000	0.143

表 2 应用 2002~2005 年 GPS/Pwv 资料预报上海地区强对流情况

月份	强对流阈值 (mm)	达到阈值次数	强对流总次数	报准次数	漏报次数	空报次数	CSI	POD	FAR
4	43	31	10	9	1	22	0.281	0.900	0.710
5	57	21	10	9	1	12	0.409	0.900	0.571
6	57	59	44	43	1	16	0.717	0.977	0.271
7	50	77	52	51	1	26	0.654	0.981	0.338
8	50	136	105	105	0	31	0.772	1.000	0.228
9	50	86	51	50	1	36	0.575	0.980	0.419

## 4 GPS/Pwv 空间分布资料的应用

GPS/Pwv 的空间分布演变资料, 可以更清楚更直观地了解降水过程中的水汽输送特征。图 6 是 2004 年 8 月 31 日 11~21 时上海地区一场中到大雨的 GPS/Pwv 分布演变图。从 11 时图上可见, 上海西南面为水汽的高值区, 东北面为水汽的低值区, 杭州的 Pwv 已达到 59.4 mm, 而上海还处于一相对干区 38.5 mm, 以后水汽的大值区由西南向东北推进, 13 时上海奉贤 Pwv 达 44.5 mm, 15 时达到 57.8 mm, 17 时为 63.5

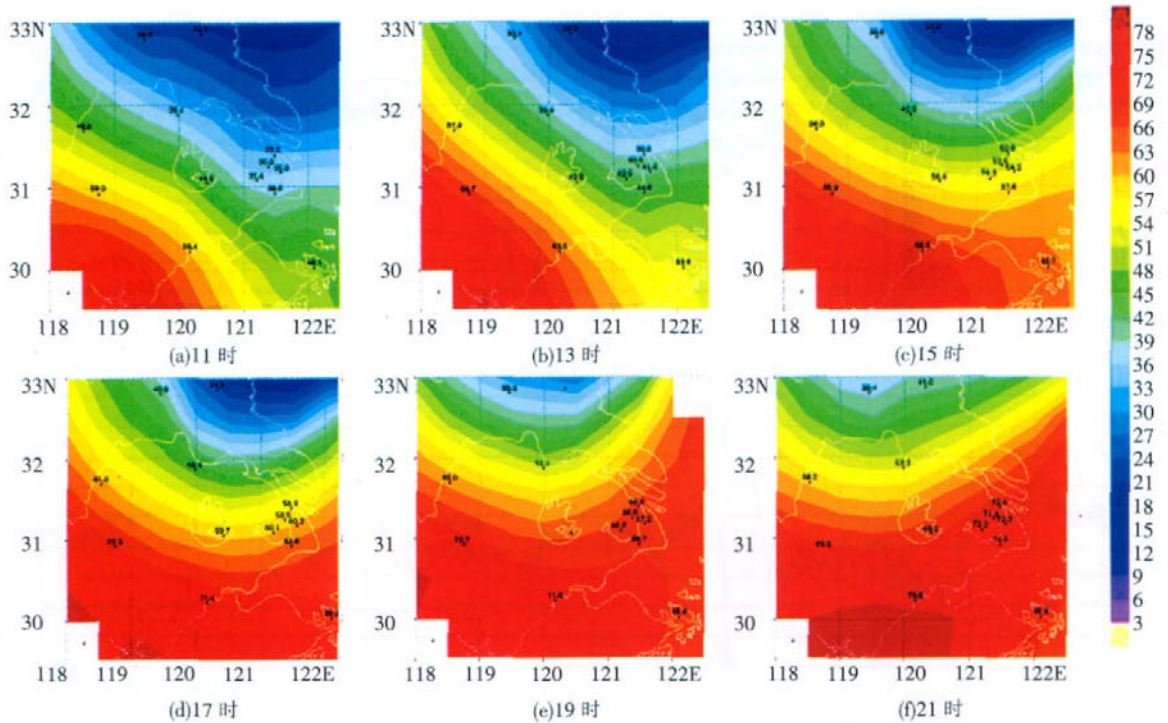


图 6 2004 年 8 月 31 日 11~21 时每 2 h 间隔上海地区 Pwv(mm)分布演变图

mm, 19 时 68.7 mm, 21 时上升到 74.3 mm。至此, 图上已构成了一条西南—东北向的强水汽带。由此可见, 8 月 31 日傍晚到夜里这次降水过程的水汽主要是这条西南水汽输送带提供的。

2004 年 9 月 1 日早晨至中午上海地区普遍出现了大到暴雨, 图 7 为这场强降水所对应的 Pwv 分布的演变图, 将图 7 与图 6 作比较, 可以看到可降水量 Pwv 的分布格局有了一个明显的变化, 在图 6 中, 水汽的高

值区在上海的西南面, 水汽的输送是由西南面输送上来的, 在图 7 中, 水汽的高值区变为在上海的东南面, 从 06 时图上可见, 舟山、奉贤的可降水量  $Pwv > 70$  mm, 杭州、宝山一线  $Pwv > 60$  mm, 马鞍山  $Pwv > 50$  mm, 水汽的输送是从上海的东南方向的东海输送上来的。因此, 2004 年 9 月 1 日早晨至中午上海地区这场强降水的水汽主要是由一支东南水汽输送带提供的, 水汽源地为东海。

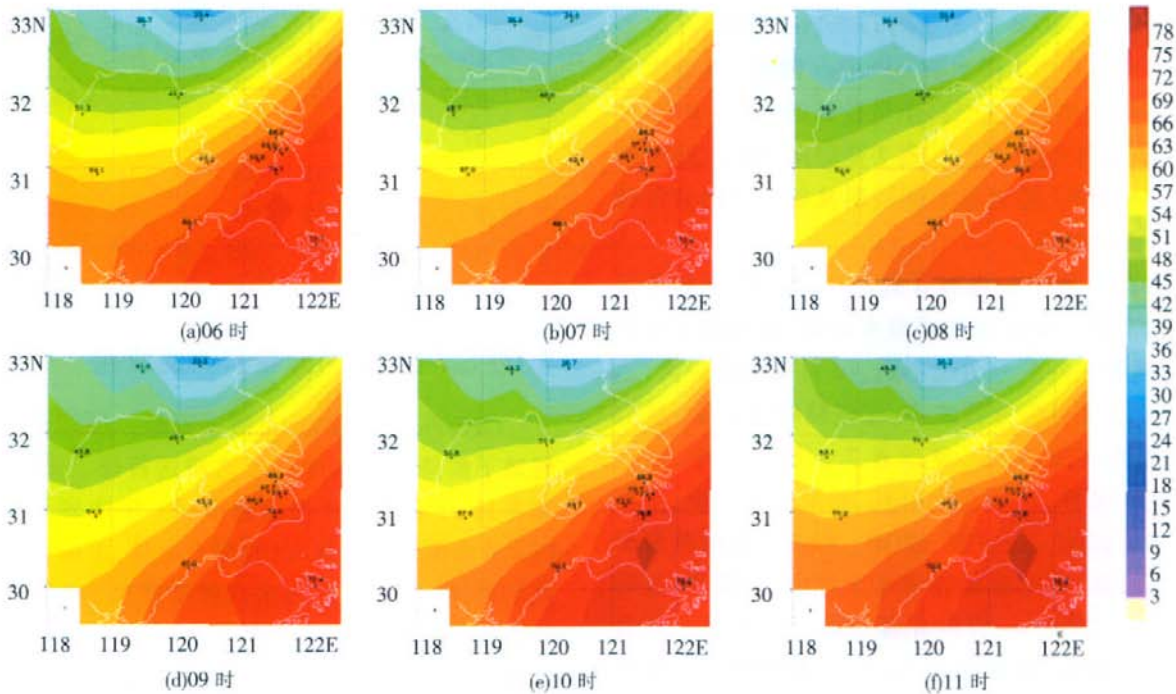


图 7 2004 年 09 月 01 日 06~11 时逐小时上海地区 Pwv(mm)分布演变图

## 5 GPS/Pwv 散度分布资料的应用

用 Pwv 散度分布资料可以清楚地反映出水汽辐合辐散的变化情况。图 8 为 2004 年 9 月 1 日 06 时 30 分至 11 时 30 分一次强降水过程的 Pwv 散度分布图, 从图上可以看到最初有较明显水汽辐合的时间在早晨 06 时, 最大水汽辐合出现在 8:30, 中心值为  $-6 \times 10^{-7} \text{ g} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{hPa}^{-1}$ , 它与 T213 提供的 850 hPa 水汽通量散度分布图也较吻合(图略)。在 8 月 31 日 20 时 850

hPa 的水汽通量散度图上长江口为  $-1 \times 10^{-7} \text{ g} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{hPa}^{-1}$ , 到 9 月 1 日 08 时 850 hPa 的水汽通量散度图上, 长江口附近出现了  $-4.8 \times 10^{-7} \text{ g} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{hPa}^{-1}$  的水汽辐合中心。而上海地区出现最大雨强的降水时段在 9 月 1 日 9~11 时, 徐汇、普陀、杨浦等地都出现了  $>20 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$  的强降水。由此可见本次暴雨过程中, Pwv 散度分布图上水汽辐合出现的时间比短历时暴雨出现的时间要提早 2 h 左右, 因此 Pwv 散度资料对发布短时强降水警报也有一定的参考作用。

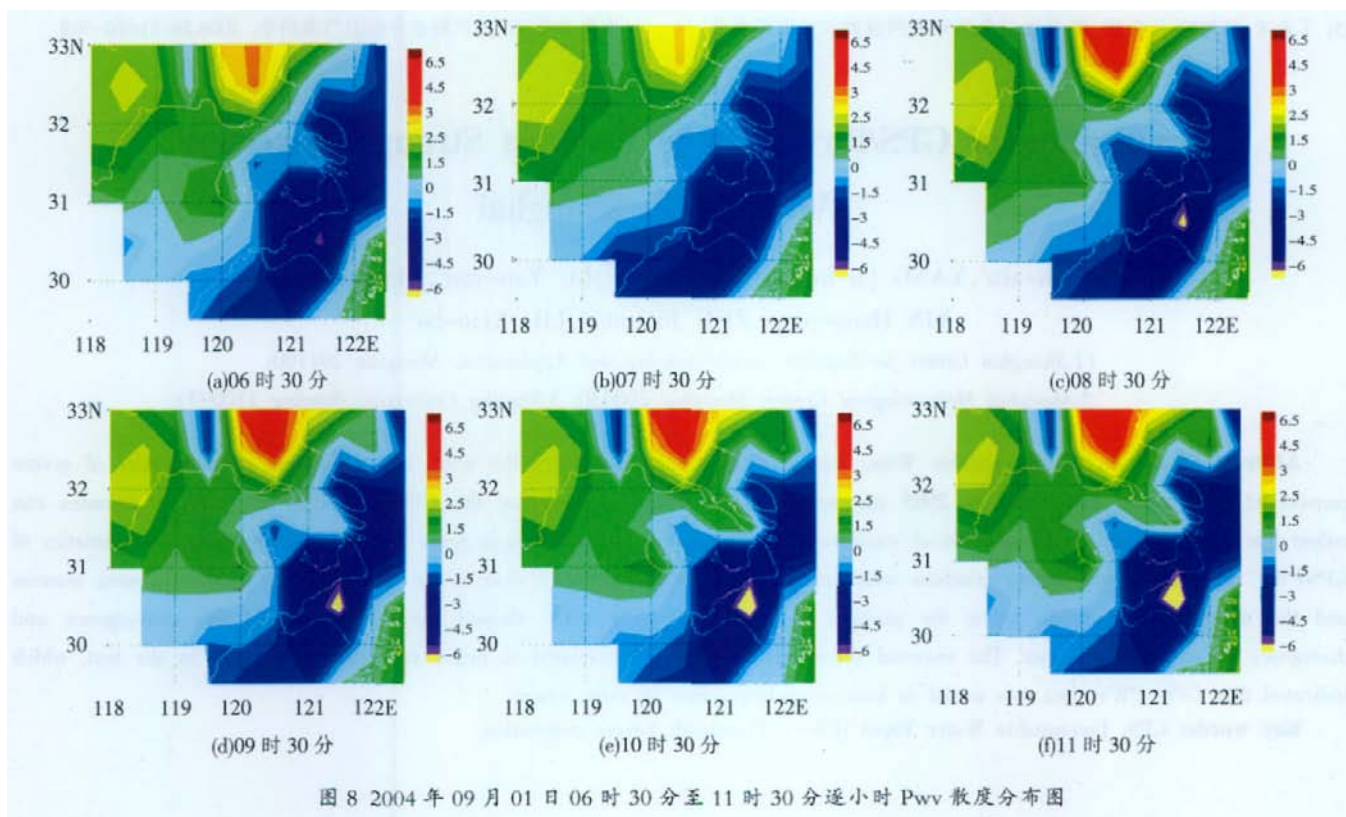


图 8 2004 年 09 月 01 日 06 时 30 分至 11 时 30 分逐小时 Pwv 散度分布图

## 6 结论

(1)GPS/Pwv 资料随时间的演变特征与强降水有较好的对应关系, 不同的季节及不同的降水类型有着不同的分布特征。

春季过程性降水特征在 GPS/Pwv 曲线有着明显的表现, 每一次降水都对应一次 GPS/Pwv 的峰值, 出现强对流天气的 GPS/Pwv 阈值要高于出现一般降水天气 20 mm, 但伪警率(FAR)较高。

GPS/Pwv 时序图可以反映入梅时大气中水汽含量的季节性变化, GPS/Pwv 时序图可作为诊断入梅时间的一种较好方法。梅雨期降水的 GPS/Pwv 阈值  $>50 \text{ mm}$ , 梅雨期强对流降水的 GPS/Pwv 阈值  $>60 \text{ mm}$ 。

盛夏期 GPS/Pwv 降水的阈值为 47 mm, 强对流的阈值为 50 mm, 相差无几, 其降水多为热雷雨产生的短时强降水(除台风产生的降水外), 考虑有降水的产

生时可同时考虑有强对流天气产生。

台风本体降水时 GPS/Pwv 可达到极值(80 mm), 台风外围云系产生降水的 GPS/Pwv 峰值要小于台风本体影响时的 GPS/Pwv 峰值 10~20 mm。降水出现在第二个波峰开始时, 若无冷空气结合, 台风外围云系产生降水不会太大。

(2)GPS/Pwv 的强对流天气预报阈值要比降水预报阈值来得高, 并且随着季节的不同, 两者之间的差值也不同。从临界成功指数(CSI)来看, 夏季 6、7、8 月份较好, 达到 0.65 以上, 但春季和秋季伪警率(FAR)较高, 因此临界成功指数(CSI)也较差。

(3)GPS/Pwv 的空间分布演变资料, 可以更清楚更直观地了解降水过程中的水汽输送特征。GPS/Pwv 散度分布资料可以清楚地反映出水汽辐合辐散的变化情况。因此 GPS/Pwv 散度资料对发布短时强降水警报也有一定的参考作用。

## 参考文献:

- [1] Liou Y A, Huang C Y. GPS observation of Pw during the passage of a typhoon[J]. Earth Planet Space, 2000, 52: 709- 712.
- [2] Duan J P, Bevis M, Fang P. GPS Meteorology: Direct Estimation of the absolute value of precipitable water [J]. Journal of Applied Meteorology, 1996, 35: 830- 838.
- [3] 丁金才, 黄炎, 叶其欣, 等. 2002 年台风 Ramasun 影响华东沿海期间可降水量的 GPS 观测和分析[J]. 大气科学, 2004, 28(4): 614- 623.
- [4] 袁招洪, 丁金才, 陈敏. GPS 观测资料应用于中尺度数值预报模式的初步研究[J]. 气象学报, 2004, 62(2): 200- 211.
- [5] 丁金才, 陆艳艳, 马晓星, 等. 长江三角洲 GPS 网观测大气可降水量的初步应用[C]//上海市气象学会. 长三角气象科技创新论坛. 上海, 2005: 223- 229.
- [6] 丁金才, 叶其欣, 黄炎, 等. 2002 年汛期长江三角洲地区 GPS 观测大气可降水量的统计分析[M]. 大气科学研究与应用. 北京: 气象出版社, 2003, 24(1): 26- 34.
- [7] Bevis M, Businger S, Herring T A, et al. GPS Meteorology: Remote sensing of atmospheric water vapor using the global positioning system[J]. J Geophys Res, 1992, 97: 15787- 15801.
- [8] 曹晓岗, 丁金才, 叶其欣, 等. 利用 GPS 反演的水汽资料诊断入梅时间的方法[J]. 应用气象学报, 2007, 18(6): 791- 801.
- [9] 杨露华, 叶其欣, 邬锐, 等. 基于 GPS/PWV 资料的上海地区 2004 年一次夏末暴雨的水汽输送分析[J]. 气象科学, 2006, 26(5): 502- 508.

## Application of GPS/Pwv Data to Forecast Strong Convection Weather in Shanghai

YE Qi-xin<sup>1</sup>, YANG Lu-hua<sup>2</sup>, DING Jin-cai<sup>2</sup>, LU Yan-yan<sup>3</sup>, XU Xiu-fang<sup>2</sup>,  
YIN Hong-ping<sup>2</sup>, ZHU Jia-rong<sup>2</sup>, LIU Xiao-bo<sup>2</sup>

(1. Shanghai Center for Satellite remote-sensing and Application, Shanghai 201100;

2. Shanghai Meteorological Center, Shanghai 200030; 3. Nanjing University, Nanjing 210093)

Abstract: Based on the Precipitable Water Vapor (PWV) data from GPS, the water vapor variation characteristics of severe convection in Shanghai from 2002 to 2005 was analyzed. The result showed that the GPS/PWV data of every 30 minutes can reflect the temporal and spatial variation of water vapor in atmosphere directly and in time; the temporal changing characteristics of GPS/PWV data had corresponding relations with precipitation with the different distribution characteristics in the different seasons and the different precipitation types; the gradient divergence of GPS/ PWV showed the distributions of the convergence and divergence of atmospheric vapor. The seasonal thresholds of GPS/ PWV related to heavy rain were also given in the text, which indicated that GPS/ PWV data was useful in forecasting heavy rain in some extent.

Key words: GPS; Precipitable Water Vapor (PWV); Threshold; Severe convection