

Reprint 724

全球衛星定位系統 (GPS) 水汽資料  
在暴雨臨近預報中的發展和應用

李炳華、唐宇輝、黎守德

中國氣象學會 2005 年年會，2005 年 10 月

# 全球卫星定位系统(GPS)水汽数据 在暴雨临近预报中的发展和应用

(分会场编号:S1)

李炳华 唐宇辉 黎守德

(香港天文台, 香港)

## 摘 要

全球卫星定位系统 (GPS) 信号的延迟和大气的水汽含量有十分密切的关系。透过 GPS 数据天顶延迟的分析, 可以估计当时大气的垂直总可降水量 (PWV)。另一方面, 由于大气中充足的水汽含量是发生暴雨的必需条件, 因此通过对 PWV 的监测, 预报员可以对暴雨发生的可能性作出客观的评估, 从而提升临近预报的能力。

香港天文台与香港理工大学近年合作发展了一套软件, 利用香港境内 GPS 接收器所搜集的数据不断分析境内 PWV 的时空分布和变化。该软件在 2004 年雨季开始进行业务试验, 更新频率由 2004 年的每 15 分钟增加至 2005 年的每 10 分钟计算实时 PWV 值。在大雨案例研究中, 系统成功地捕捉暴雨的发展和变化。本文简介该系统的设计原理, 评估系统在暴雨临近预报应用中的表现, 及探讨将来的研究发展方向。

## 1 引言

大气中的水汽含量是了解大气变化的一个十分重要的讯息。大气中的水汽可以利用探空气球或微波辐射计量度。前者一般每隔六或者十二个小时才进行一次探测, 对掌握中小尺度对流活动的效用十分有限。后者虽然可以作连续观测, 但由于微波容易被雨点吸收或散射, 回波信号一般在降雨天气下的杂信很大, 因此并不适宜在大雨的环境下应用。加上微波辐射计成本既昂贵, 又只能提供单点数据, 所以应用并不普遍。

近年的研究发现透过分析全球卫星定位系统 (GPS) 信号的延迟, 可以准确推算大气中的水汽含量。加上GPS信号对水滴、冰晶等凝固水态并不敏感, 因此理论上可以在任何天气环境下连续不断探测大气中的水汽含量。兼且GPS接收器价格便宜, 容易安装, 令GPS水汽探测技术在气象界中的应用越来越受到重视。

由于大气中蕴含充足水汽是暴雨发生的必要条件, 透过对GPS信号的不断监测, 预

报员可以更准确地评估暴雨出现的机会。香港天文台与香港理工大学近年合作发展了一套实时GPS水汽分析系统，每10分钟计算香港地区的大气垂直总可降水量 (PWV)。该系统在2004年雨季开始进行业务试验，24小时不断分析境内PWV的时空分布和变化。本文介绍该系统的设计和系统在大雨案例中的应用效果。

## 2 GPS/PWV 原理

GPS无线电波在大气中的传输因受到大气介质的折射而沿曲线前进，传播速度和在真空的速度相比下发生延迟效应。总延迟距离  $\Delta L$  与大气折射率有关：

$$\Delta L = \int_s N ds$$

其中  $N$  为无线电波沿曲线  $s$  传播时经过大气的折射率。 $N$  和大气的状态有以下的关系 [1]：

$$N = \left[ -4.03 \times 10^6 \frac{n_e}{f} \right] + \left[ 77.6 \frac{P_d}{T} \right] + \left[ 70.4 \frac{P_v}{T} + 3.739 \frac{P_v}{T^2} \right]$$

其中  $n_e$  为大气中的电子密度， $f$  为电波的频率， $P_d$  为干空气的部分气压， $P_v$  为湿空气的部分气压， $T$  为大气温度。程序中右面第一项代表电离层的影响，第二项代表干空气的影响，而第三项则为大气中水汽部分的影响。

电离层的影响可以透过同时分析不同频率的GPS信号差异来确定，而干空气的影响可以通过静力模型来计算[1]。因此我们可以将前两项从总延迟中抽离出来，得出剩余水汽部分的总湿延迟  $\Delta L_w$ 。

总天顶湿延迟(Zenith Wet Delay, ZWD)与总湿延迟的关系为

$$ZWD = \Delta L_w \csc \theta$$

其中 $\theta$ 为天顶角。大气中的垂直( $z$ )总水汽量是

$$PWV = \int \rho_v dz$$

其中 $\rho_v$ 为空气中的水汽密度。Bevis等[2]证明，ZWD与PWV有以下关系：

$$PWV = \Pi \times ZWD \quad (1)$$

而程序中的投影函数是

$$\Pi = \frac{10^6}{\rho R_v \left[ \frac{k_3}{T_m} + k_2 - wk_1 \right]} \quad (2)$$

投影函数中的 $k_1, k_2, k_3, w$ 为物理常数， $\rho$ 为水的密度， $R_v$ 为大气常数(水汽)，而 $T_m$ 为大气的平均温度。 $T_m$ 与地面温度 $T_s$ 和温度廓线有关。通过分析香港1995至2002年的探空资料，得出 $T_m$ 和 $T_s$ 的线性关系：

$$T_m = 106.7 + 0.605T_s \quad (3)$$

### 3 GPS/PWV 实时分析系统

香港地政总署设置于香港境内的双频GPS地面接收器自2001年开始逐步投入业务运作，数量从2002年的五台接收器增加到2005年的十二台。每10分钟将接收范围内的GPS卫星轨道、导航以及该站点的气象数据传送到香港天文台总部进行分析。天文台与香港理工大学合作发展的实时分析系统，采用由美国麻省理工大学发展的GAMIT程序[3]对GPS数据作预处理，计算ZWD，再利用方程（1）-（3），每10分钟计算每一个GPS站附近

的大气垂直总可降水量PWV，并透过网页向预报员发布。图一显示香港GPS地面接收器的分布，和2005年7月9日部分GPS站数据所推算出来的二十四小时PWV变化。

为了评估GPS/PWV的可靠性，我们利用探空数据推算的PWV来作对比。图二是2002年6月至9月每天早上00 UTC的GPS/PWV与探空/PWV的比较。结果显示GPS/PWV和探空/PWV十分吻合，相关系数达0.93，均方差只有2.9毫米，数值与其它研究类同[4]。

#### 4 GPS/PWV与暴雨的关系

由于每一个GPS站所处的高度不一样(由20米到260米不等)，它们之间的PWV数值必然存在系统性的分别，不能透过它们的绝对值来比较大气水汽的区域性差异。要除去系统差异，我们对每一个GPS站作了统计研究。表一是2002年夏季(4月到9月)香港的GPS站PWV长期平均值和标准差。计算结果显示大部分的GPS站的PWV平均数皆接近55毫米，惟独HKST站只有50毫米，而标准差则介乎8.0至8.5毫米不等。基于这些统计数字，我们可以得出一个标准化的系数 - GPS/PWV偏离系数(PWV anomaly - PWV\*)：

$$PWV^* = (PWV - \overline{PWV}) / \delta PWV$$

其中 $\overline{PWV}$ 为该站的PWV长期平均值，而 $\delta PWV$ 是它的标准差。PWV\*不但将站与站之间的系统性差异除掉，还可以凸显大气水汽含量在短时间内与平均值的对比。正值的PWV\*代表水汽比平均水平为高，而负值的PWV\*代表水汽比平均水平低。透过PWV\*值的变化，预报员可以知道水汽是在累积或是在消散，从而估计雨势的增强或减弱。

透过2002年5月至9月GPS的PWV\*值与当时在该GPS站附近的雨量计逐小时雨量的比较，我们试图了解PWV\*与雨量的关系。图三的X轴为PWV\*值，Y轴为对应的一小时雨量值。研究发现在微雨或中雨的环境下，PWV\*总是偏低。但当暴雨发生时（即一小时雨量大于30毫米），PWV\*总是大于1.0，即是大气中的总水汽量必需比平均值超过一个标准差以上才会发生暴雨。相反地如果PWV\*小于1.0，水汽条件还未成熟，发生暴雨

的机会便相对地较低。

## 5 业务上应用的效果

天文台的GPS/PWV系统在2004年雨季投入业务试验。系统每15分钟计算PWV\*值的变化,为预报员提供暴雨可能性的临近预报。图四是2004年5月8日一个暴雨案例中雷达回波与当时PWV\*变化的时间序列。从5月7日黄昏开始,PWV\*的数值已经升至0.8、0.9的高值,不过当时在雷达上还未出现强回波。入夜后PWV\*继续缓缓上升,到零晨时分超越1.0,而雷达回波也变得更密更强。清晨四时,PWV\*已经超过1.5,境内广泛地区开始录得超过30毫米的雨,预报员在四时十分发出黄色暴雨警告。PWV\*值持续偏高,显示大气有源源不绝的水汽供应。与此同时,沙田的GPS站(HKST)的PWV\*值继续增加,并在早上七时超过2.0。二十分钟后境内的雨量计录得超过每小时70毫米的雨,当时天文台需要发出黑色暴雨警告。约一小时后,PWV\*开始稳步下降,雷达回波亦随之而消散,雨势逐渐舒缓。事实上GPS/PWV在大雨发生差不多五个小时以前已经提示爆发暴雨的可能性,这比单看雷达回波发展趋势来判定下大雨可能性的直观方法,时效长得多和更能够提供客观指导作用。

图五是2004年4月1日的案例。早上十时开始从雷达图像上发现在香港西北约60公里地方有回波向东南移近香港。面对慢慢逼近的雨带,预报员正要考虑是否需要发出暴雨警告。虽然当时PWV\*有些微波动,但没有明显增加,并一直徘徊在-0.5附近的低水平,显示大气的水汽含量不足以让暴雨发展,水汽亦没有累积的趋势。事实上,当回波到达香港上空的时候不单没有增强,反而慢慢地减弱消散,雨势发展与PWV\*的客观指引一致。

## 6 结论及未来发展

利用GPS信号延迟的原理而发展的一套计算机软件于2004年开始在香港天文台进行业务试验,效果良好,成功分析大气中的总水汽含量,PWV值与探空相比十分接近,虽然年内暴雨案例较少而未能进行充分的验证统计,但在个别案例研究中已显示该系统对

暴雨发展的可能性提供了颇为可靠的参考指引。

大气中充足的水汽含量是发生暴雨的必要条件，水汽含量偏低时，发生暴雨的机会较微。可是水汽充足也并不一定会发生暴雨，还需要动力和热力方面的诱发机制配合。这些信息可以从其它方面途径取得，包括探空气球、风廓线仪、声雷达、飞机报告、数值预报等。我们正尝试将GPS/PWV的数据与各项动力和热力参数作相关比较，期望能藉此减低GPS/PWV的虚报率。

另外GPS的数据不但可以用来计算局部地区内大气的总水汽含量，其实亦可以估计水汽在大范围三维空间的分布。香港天文台和香港理工大学正在开发另一套计算机软件，目的是研制一个频密更新的三维水汽分析系统，为数值预报提供较准确的初始场，从而提高暴雨预测的可靠性[5]。

鸣谢

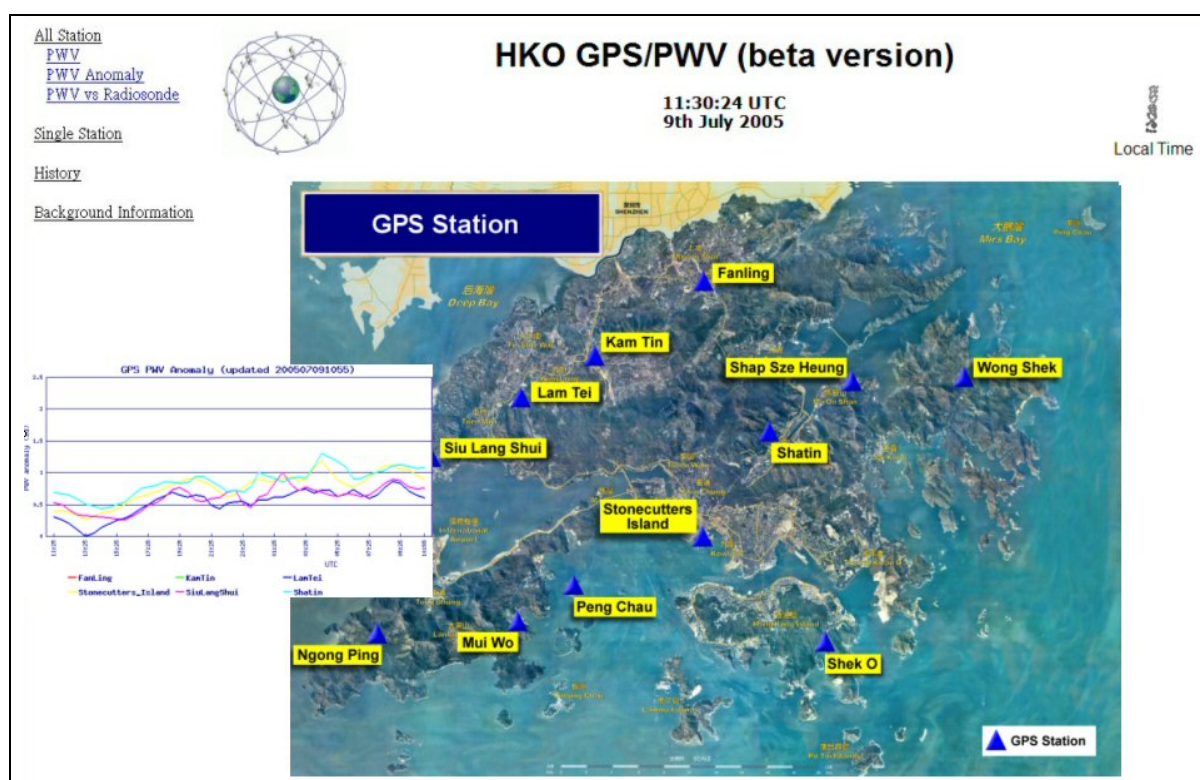
作者感谢香港地政总署提供宝贵的GPS数据，和黄明松博士对文章内容的指正。研究项目获得HK RGC(PolyU A/C BQ-609)资助。

## 参考文献

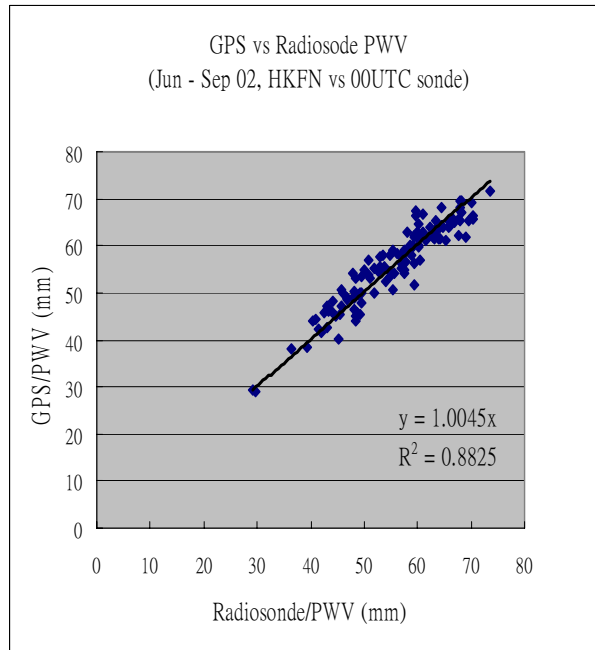
- [1] Bevis, M., S. Businger, T.A. Herring, C. Rocken, R.A. Anthes, and R.H. Ware, 1992. GPS Meteorology: Remote Sensing of Atmospheric Water Vapour Using the Global Positioning System. *J. Geophys. Research*, **97**, 15787-15801.
- [2] Bevis, M., S. Businger, S. Chiswell, T.A. Herring, R.A. Anthes, C. Rocken and R.H. Ware, 1994. GPS Meteorology: Mapping Zenith Wet Delays onto Precipitation Water. *J. Appl. Meteor.*, **33**, 379-386.
- [3] GAMIT website <http://www-gpsg.mit.edu/~simon/gtgk>.
- [4] Liou Y.A., Y.T. Teng, T.V. Hove and J.C. Liljegren, 2001, Comparison of Precipitable Water Observations in the Near Tropics by GPS, Microwave Radiometer, and Radiosondes, *J. Appl. Meteor.*, **40**, 5-15.
- [5] Seko, H., T. Kawabata, T. Tsuyuki, H. Nakamura, K. Koizumi and T. Iwabuchi, 2004, Impacts of GPS-derived Water Vapor and Radial Wind Measured by Doppler Radar on Numerical Prediction of Precipitation, *J. Meteor. Soc. Japan*, **82**, 473-489.

表一 香港境内 GPS 站 2002 年 6 月至 9 月推算的 PWV 统计值

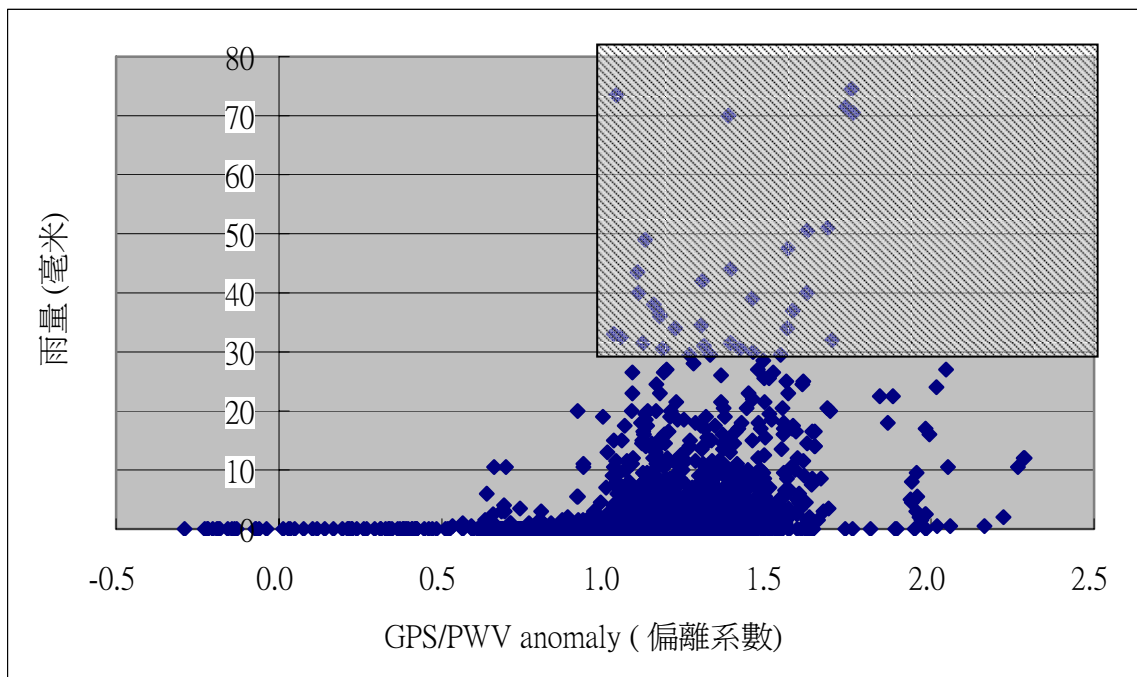
| GPS 站 | 平均 (毫米) | 标准差 (毫米) |
|-------|---------|----------|
| HKFN  | 55.98   | 8.43     |
| HKKT  | 55.26   | 8.41     |
| HKLT  | 55.06   | 8.29     |
| HKSL  | 54.75   | 8.55     |
| HKST  | 50.72   | 7.97     |



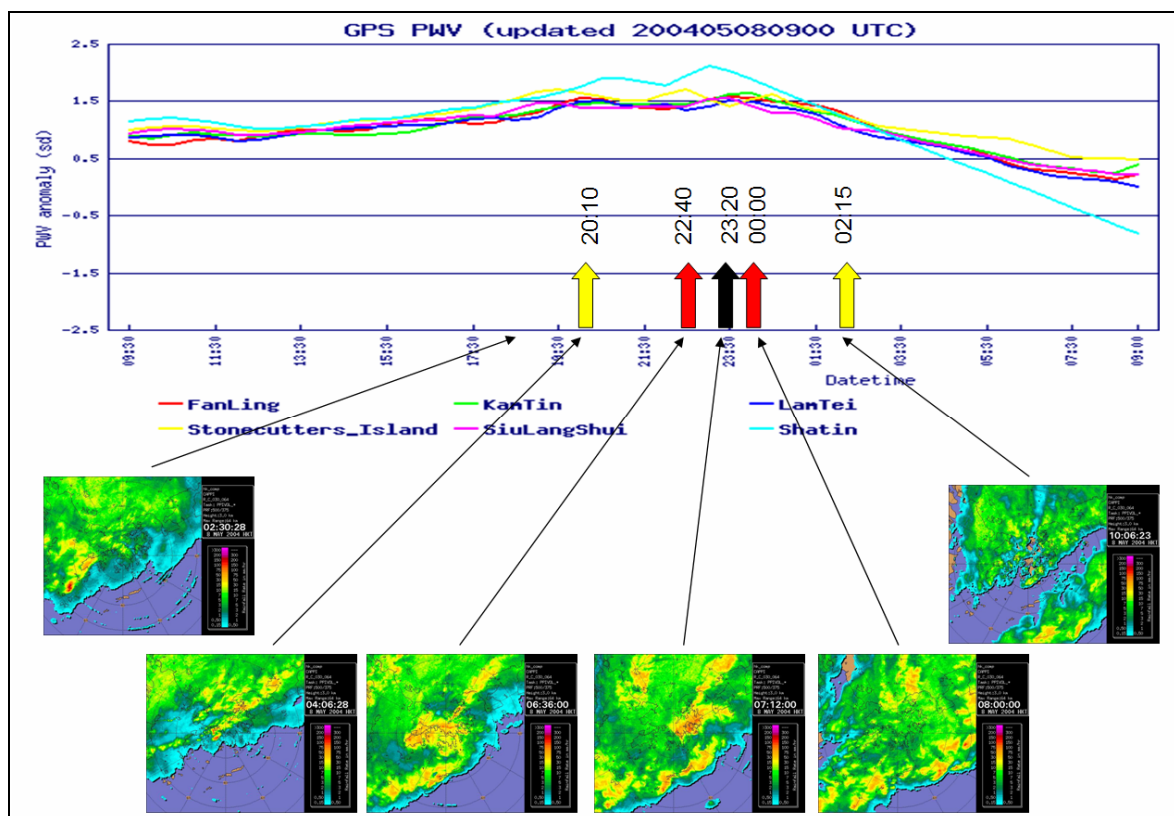
图一 香港 GPS 接收器网络和每个 GPS 站 PWV 变化的时间序列(小图)



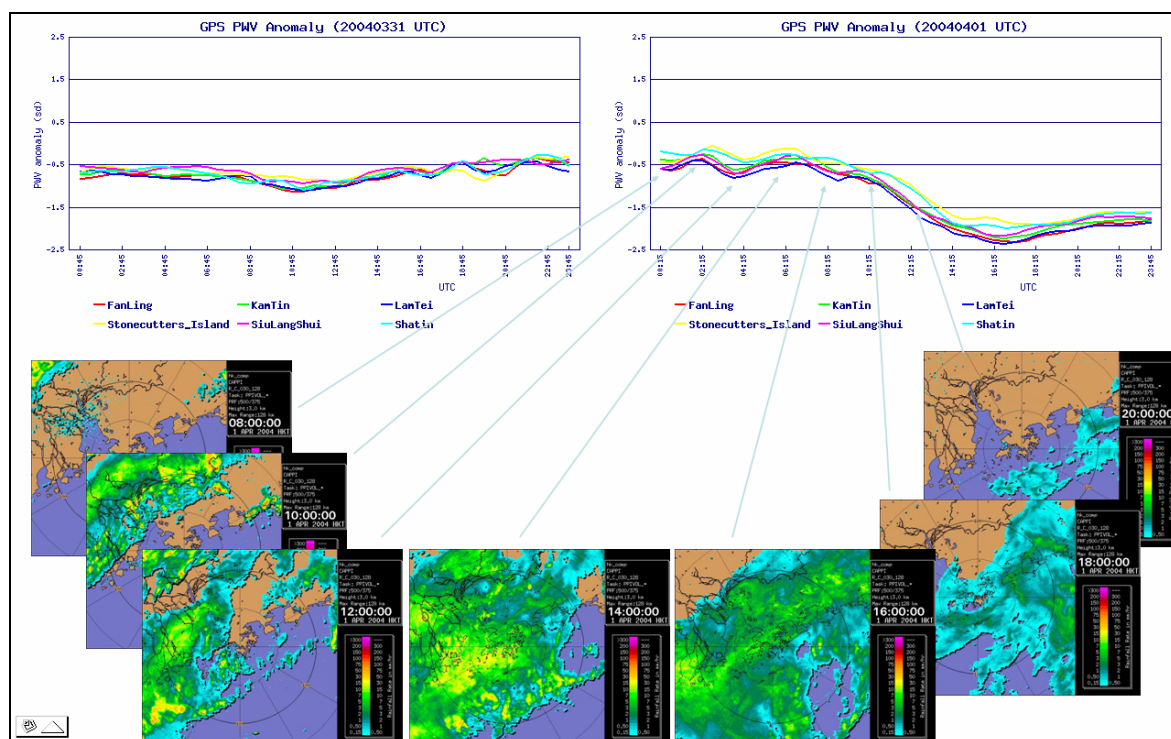
图二 2002 年 6 月至 9 月 GPS/PWV 和探空 PWV 的比较



图三 GPS/PWV 偏离系数 PWV\*和雨量的关系。右上方斜纹范围为每小时大于 30 毫米的暴雨案例。



图四 2004 年 5 月 8 日暴雨案例中，雷达回波与 PWV\*随时间变化的关系。黄、红、黑色箭头分别显示黄、红、黑色暴雨警告的发出时间。



图五 2004 年 4 月 1 日的案例，雷达回波与 PWV\*随时间变化的关系。