

大氣可降水量與降雨量關係研究

呂冠毅

Lu Guan-yi

空軍航空技術學院軍事學科部

摘要

充足的水氣供應是降雨生成的基本條件。傳統的地面觀測站，容易受到空間及經費的限制，不易廣泛設置，氣象站及雨量站取樣數據常僅在地面，沒有向高空垂直延伸。因此利用衛星觀測資料之高空分辨率及觀測時間的連續性，可以補足這項高空分佈不足之缺點。GPS 的衛星訊號從高空到地面，其傳播路徑之訊號中所含之對流層水氣，具有垂直方向的分布特徵，是一種另類的觀測數據源。本研究即以 GAMIT 軟體，反演 2010 年 7-9 月，設置在台南曾文溪以南 GPS 站的觀測資料。

針對台南地區的大氣可降水量(Precipitable Water Vapor,PWV)之時空分佈特徵，以及台南地區午後中尺度降雨時間及地點特性，進行分析、研判，並引用中央氣象局地面測站及自動雨量站降雨資料，來進行資料交叉比較、分析。結果顯示，GPS 測站在地理空間位置的相鄰環境下，其水氣變化趨勢呈現高度相關性。而最大可降水量與最大雨量發生的時間，其時間差也有一常量關係存在。初步研判這一個時間差，係受到地形與對流效應影響，而產生的不同延遲效應。

關鍵詞：中尺度、全球定位系統、對流層、大氣可降水量

Abstract

The rapid development of mesoscale rainstorms in summer, adequate supply of water vapor is generated of the basic conditions. The traditional ground-based observatories, space and funding are vulnerable to the restrictions, uneasy to set up a wide range. Therefore, high-altitude satellite observations of the resolution and continuity of observation time, can make up for lack of distribution of the shortcomings. GPS signals are delayed by water vapor, dry air, hydrometeors and other particulates. This study use GAMIT software, inversion July to September 2010, set in the south of Tainan GPS station observation data. More Tainan area rainfall relations with precipitable water vapor. Preliminary conclusion that the precipitation and rainfall may be the time difference, the Department of the terrain and the effect of convection, arising from the different delay effects.

Keywords: Mesoscale, Global Positioning System, Tropospheric, Precipitable Water Vapor

一、前言

台灣位處亞熱帶，四面環海，地形海拔變化大，造就顯著的海陸分布與複雜之地形環境條件，反應在天氣變化上，便產生多變的樣貌，在夏季除受颱風及梅雨所帶來的強降水外，就屬午後中尺度降雨為較常發生的天氣現象，除伴隨雷雨胞出現的雷擊閃電外，集中在小範圍的瞬間強降雨，常為地勢較低區域帶來不同程度的積水情形，因此夏季午後中尺度降雨造成的生命財產損失雖不及梅雨鋒面或颱風所帶來的豪大雨，不過同樣造成交通、農作物與地質等災害損失，隨著近年來觀測技術的進步與廣泛應用，使得我們漸漸了解，劇烈且具殺傷力的天氣現象(如強烈降水與風暴)常侷限於中小尺度的範疇，而目前全世界氣象界的最大瓶頸之一，即為一、二十公里範圍之中小尺度風雨預報技術，而支援此預報所需的中尺度氣象資料仍相當不足。此外，由於台灣特殊的地理環境與降水過程的複雜度和隨機特性，局部地區突發性豪雨的預測困難度相當高，也降低了洪水與坡地災害預警的可信度。

大氣中的水氣分布約有 99.99%集中於對流層中，其中大部分的水氣(50%)分布於地表至 2 公里的大氣層範圍之內，2 至 4 公里所含水氣約佔總水氣 25%，其他水氣則分布在 4 到 10 公里這個範圍之中(葉等，2012)。雖然水氣對整個大氣範圍所佔有的比例約 4%，但由於水可以在自然界中三態並存，並藉由這些三態相位的改變而產生各種天氣現象，水的三態變化中會釋放或吸收能量，其中水氣的蒸發與凝結能夠吸收或釋放潛熱，這些熱量的傳輸，便是颱風、雷雨等天氣現象的能量所在，而本研究即利用 GPS(Global Positioning System)的高時空分辨率及觀測時間的連續性，將大氣中所含水氣作有效估計，並與降雨資料進行比對，試圖尋找大氣水氣變化與降雨間之關係。檢視台南地區 2010 年 7-9 月份午後降水個案後，挑選出 3 個降雨強度達到大雨標準的中尺度降雨個案，經天氣系統分析後以符合午後中尺度降雨的 2 個案進行分析，利用經濟部地質調查所及中研院地球所於台南地區及同緯度高雄山區 GPS 觀測資料，以 GAMIT 軟體反演大氣可降水量(Precipitable Water Vapor PWV)，並藉由中央氣象局地面測站及自動雨量站降雨資料，來進行資料交叉比較與分析，以便瞭解大氣可降水量與降雨之時間關係，並藉此提供氣象客觀預報之預報參考。

二、研究方法

2.1 對流層的物理特性

由非電離層大氣所折射造成的延遲可稱為中性延遲(Neutral delay)，由於這部分的大氣折射造成的延遲主要集中在對流層，故又稱對流層延遲(Tropospheric delay)。由於電磁波在該層傳播速度主要受到大氣壓力、溫度與水氣的改變影響，而造成傳播路徑上折射率發生

變化，此影響稱為對流層折射誤差(Tropospheric Refraction Error)，此外，接收機所在的高度與地形亦會影響其變化。一般而言折射率造成影響可由下列兩點說明，表示如圖 1：

(1)速度遲延：因對流層折射率較真空折射率大，故電磁波通過對流層時速度減慢。

(2)路徑彎曲延遲：由於大氣各高度折射率並非一致，因此電磁波傳遞的路徑為曲線而非直線，造成訊號傳遞路徑變長，通常仰角大於 15 度時其延遲量不大於 1 公分(Bevis et al,1992)，因此在計算誤差時常忽略此項。

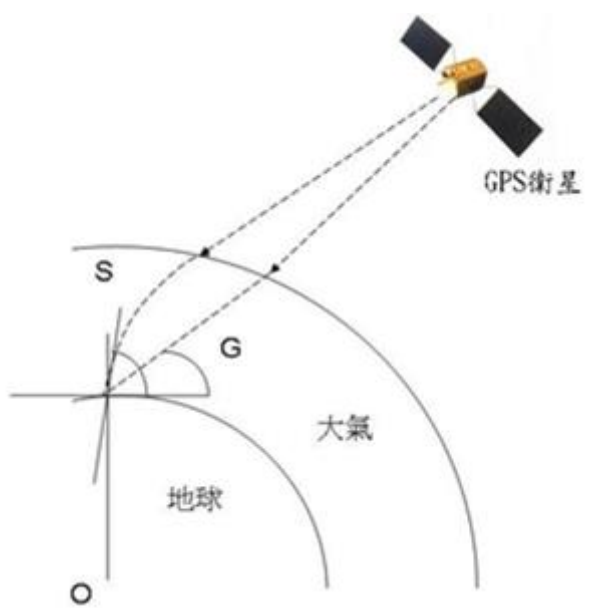


圖 1. 對流層延遲示意圖

由折射效應所造成的延遲量，其天頂方向可表示如下(Bauersima,1983)：

$$\Delta L^z = \int c dt = \int c \left(\frac{ds}{v} - \frac{ds}{c} \right) = \int \left(\frac{c}{v} - 1 \right) ds = \int (n - 1) ds = 10^{-6} \int N ds \quad (1)$$

式中 ΔL^z 為對流層折射效應在天頂方向的延遲量， dt 為電磁波在實際大氣中傳播的時間與其在真空中傳播的時間差， ds 為天頂方向的路徑，對流層中的傳播速度為 v ，路徑上空氣介質之折射係數為 n ， N 表示空氣折射率。

而對流層折射造成的延遲影響可分為乾空氣引起的靜力延遲 (Hydrostatic delay) 或稱乾延遲(Dry delay)與水氣分子引起的濕延遲(Wet delay)兩部分。靜力延遲的影響來自於大氣壓力及絕對溫度，受環境影響較小，其延遲量占總延遲量的 90% (Rocken,1995)；濕延遲的影響與水氣分壓有關，雖然影響僅佔總延遲量的 10%，但受天氣因素的影響甚多，其變化量差異可達數倍，藉由 Thayer(1974)提出的折射率公式：

$$N = N_d + N_w = k_1 \frac{P_d}{T} + (k_2 + \frac{k_3}{T}) \frac{P_w}{T} \quad (2)$$

式中空氣、乾空氣及溼空氣折射率分別以 N 、 N_d 及 N_w ，而 P_d 及 P_w 則表示乾空氣及溼空氣分壓， T 為氣溫以 $^{\circ}K$ 表示， k_1 、 k_2 、 k_3 分別為與折射率有關之折射常數。

則乾、溼空氣折射效應所造成的延遲量可分別表示為下列兩式。

$$\Delta L_d^z = 10^{-6} \int N_d ds = 10^{-6} \int k_1 \frac{P_d}{T} ds \quad (3)$$

$$\Delta L_w^z = 10^{-6} \int N_w ds = 10^{-6} \int (k_2 + \frac{k_3}{T}) \frac{P_w}{T} ds \quad (4)$$

式中 ΔL_d^z 及 ΔL_w^z 分別表示乾空氣與溼空氣折射效應所造成的延遲量。

大氣中液態水、冰與凝結物對 GPS 訊號傳遞影響微乎其微，許多理論研究證明，即使是厚實的雲層，最多引起 7.5mm 的延遲(Duan 1996；Busings 1996)。然而水氣對於電磁波的影響卻是非常敏感，以每莫耳水氣的折射率大約是乾空氣的 17 倍(Busings 1996)，因此，儘管水氣僅占大氣組成的 0.1 ~ 4%，但水氣造成的延遲量卻占大氣總延遲的 10%，且水氣引起的濕延遲量有時在 1 小時內變化可達 20mm 以上，這使得水氣造成的濕延遲量很難有效進行估計，成為 GPS 定位中難以去除的一個誤差源。

水氣在氣象上是一個極為重要的物理量，因水氣與雲和降水有著密切的相關性，且水氣的相變會產生很高的相變潛熱，影響著大氣的穩定度、氣旋系統的結構與發展以及地球內能量輻射的平衡，亦是全球氣候系統中關鍵的溫室氣體，因此，藉由 GPS 定位中這個誤差源來反演大氣中的水氣，來解析部分的天氣系統的演變機制，成為 GPS 定位的另一科學與氣象學的應用。

2.2 GAMIT 程式求解濕空氣含量及可降水量

GAMIT 程式於解算時利用雙頻及載波相位等觀測原理，除了整周未定值 N 之外，可將 GPS 衛星和地面接收機間訊號所產生之誤差消除，如虛擬觀測值為衛星到接收儀之真實距離(R)加上接收機時鐘誤差(dt)、衛星時鐘誤差(dT)、電離層延遲誤差(Ion)、對流層延遲誤差($Trop$)及虛擬距離觀測量之雜訊與多路徑效應等殘差(ε)，其載波相位觀測方程式(Leick, 2004)可改寫為下列關係式：

$$\phi = R + c(dt - dT) + Trop + Ion + N\lambda + \varepsilon \quad (5)$$

藉由雙頻觀測可消除電離層所造成之延遲誤差，載波相位觀測藉由一次差及二次差可消除接收機時鐘及衛星時鐘之誤差，故其所得觀測值便以對流層延遲所造成之誤差為主要誤差。

因此本研究是由 GPS 載波相位相對定位來求解對流層天頂向延遲量(ZTD)，藉由 Saastamoinen 模式解算乾空氣天頂向延遲量(ZDD)，再利用對流層天頂向延遲量減去乾空

氣天頂向延遲量，便可得濕空氣天頂向延遲量(ZWD)其關係式如下：

$$ZWD = ZTD - ZDD \quad (6)$$

在求解濕空氣含量及可降水量時首先必須求得 ZTD，而求解 ZTD 時除上述利用雙頻觀測、二次差外尚須導入映射函數(mapping function)因 GPS 訊號並非全是天頂向，對於斜路徑之訊號必須透過映射函數轉換，將其他路徑訊號轉為天頂向，而本研究處理對流層使用的便是 Niell 映射函數。其表示是如下式：

$$m(\theta) = \frac{1 + \frac{a}{1 + \frac{b}{1 + c}}}{\sin(\theta) + \frac{a}{\sin(\theta) + \frac{b}{\sin(\theta) + c}}} \quad (7)$$

接下來的步驟為利用 Saastamoinen 經驗模式求解天頂向乾延遲量，其計算天頂向乾延遲的公式(Saastamoinen,1972；Davis et al.,1985；Elgered et al.,1991)為

$$ZDD = 10^{-6} \frac{k_1 R P}{g_m M_d} = 10^{-6} \frac{k_1 R_d P_s}{g_m} = \frac{2.2767 P_s}{f(\varphi, h_0)} \quad (8)$$

式中：天頂乾延遲 ZDD 的單位為 mm； P_s 為地面氣壓(hPa)； $R=8.31434\text{J}/(\text{mol}\cdot\text{K})$ ，為理想氣體常數； $M_d=28.9644\text{g}/\text{mol}$ ，為乾空氣莫耳質量； $R_d = R / M_d$ ； $g_m=9.784 / f(\varphi, h_0)$ ，為垂直大氣柱質量中心的重力加速度； $f(\varphi, h_0)$ 為測站緯度與高程之函數。

藉由 Saastamoinen 經驗模式所求得之 ZDD 與 ZTD 相減之後便可得到 ZWD，而 ZWD 與 PWV 間的關係為下式(Bevis et al.,1992,1994)：

$$PWV = \Pi \times ZWD \quad (9)$$

其中

$$\Pi = \frac{10^6}{\rho(k_2' + k_3' / T_m)} \quad (10)$$

式中 Π 為轉換因子， k_2' 及 k_3' 為常數，分別為 $22.1 \pm 2.2 \text{Kmb}^{-1}$ ， $(3.739 \pm 0.012) \times 10^5 \text{K}^2 \text{mb}^{-1}$ ， T_m 表示加權平均溫度，此為大氣層水氣分壓加權平均溫度，本研究所使用的參數均參考(Liou et al., 2000)由輻射計與探空氣球針對台灣地區 20 年(14610 筆探空資料)統計求得之迴歸係數。

三、成果與分析

本研究總共挑選 2010 年 7-9 月份於台南市發生的兩個午後強降雨個案，因正值颱風盛行的月份，個案挑選時在綜觀天氣方面，排除熱帶氣旋或颱風降雨直接影響，且無大尺度的天氣系統影響研究區域天氣的因素，所挑選個案日期分別為 7 月 21 日，當日累積雨量 82，最大時雨量 60.5 及 8 月 15 日，當日累積雨量 62.5，最大時雨量 20.5，分析討論時依發生的日期以 DOY 表示則 7 月 21 日簡稱為 202 個案而 8 月 15 日簡稱為 227 個案。

研究地區的 GPS 觀測站與氣象測站與自動雨量站分布如圖 2，中央氣象局局屬觀測站與自動氣象觀測站資料如表 1，GPS 觀測站資料如表 2。

透過 GPS 及地面氣象站的降雨資料進行分析，以 202 及 227 個案的 GPS/PWV 在同一時間其測站延遲量之比較，可由圖 3a 及 3b 中我們可以發現，計算出來的大氣可降水量變化趨勢非常一致，因此我們統計各測站間大氣可降水量的關係係

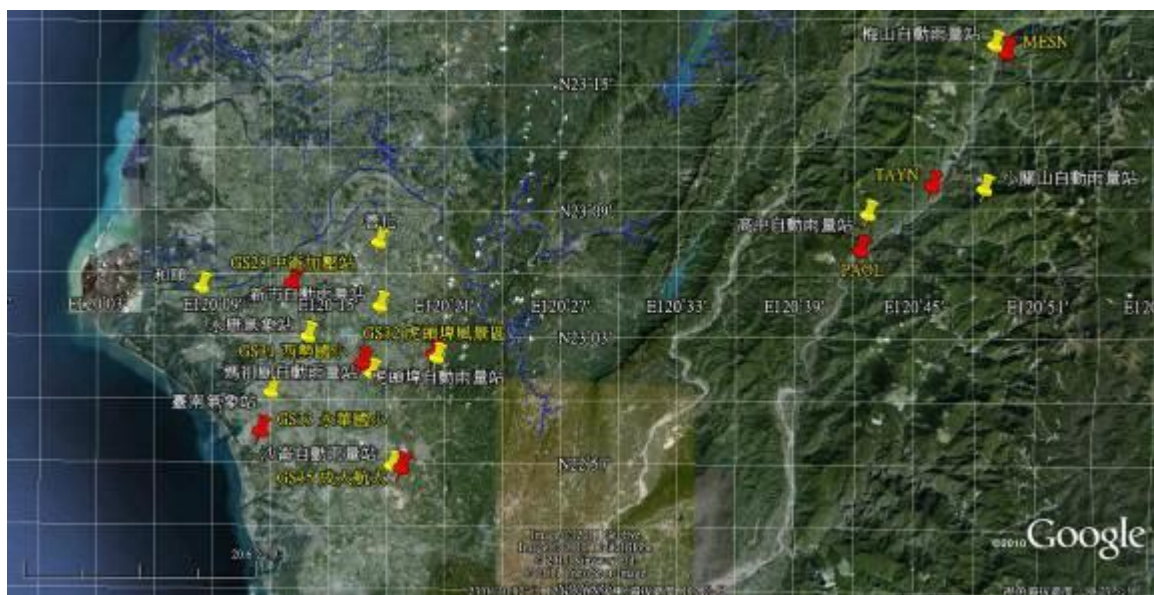


圖 2. GPS 觀測站與氣象測站與自動雨量站分布圖

表 1.中央氣象局局屬觀測站與自動氣象觀測站資料表

站號	站名	高度(m)	緯度	經度
467410	臺南	13.8m	22°59' 42.81" N	120°11' 49.18" E
467420	永康	8.1m	23°02' 22" N	120°13' 43" E
C1095	和順	4 m	23°04'42" N	120°08'12" E
C1097	虎頭埤	60 m	23°01'23" N	120°20'23" E

C1O99	媽祖廟	23 m	22°59'36" N	120°17'07" E
C1N00	沙崙	25 m	22°56'15" N	120°18'04" E
C1O98	新市	76 m	23°03'50" N	120°17'26" E
C0O90	善化	64 m	23°06'52" N	120°17'22" E
C1V23	高中	760 m	23°08'12" N	120°42'32" E
C1V22	小關山	1781 m	23°09'21" N	120°48'19" E
C1V20	梅山	860 m	23°16'08" N	120°48'55" E

表 2.本研究選取的 GPS 連續觀測站表

站名	測站全名	緯度(°)	經度(°)	高度(m)	建站單位
GS28	中崙加壓站	23.08098	120.2144	26	經濟部地調所
GS31	西勢國小	23.01890	120.2758	44	經濟部地調所
GS32	虎頭埤風景區	23.02578	120.3371	57	經濟部地調所
GS33	永華國小	22.96442	120.1878	25	經濟部地調所
GS35	成大航太	22.93552	120.3094	51	經濟部地調所
PAOL	寶來	23.10862	120.70287	431	中研院地球所
TAYN	桃源	23.15934	120.76419	645	中研院地球所
MESN	梅山	23.27540	120.72090	751	國土測繪中心

數，其結果如表 3a 及 3b 所示與地形高程呈現高度相關，因此，在相鄰的地理位置下，其環境水氣分布應大致相同，至於為何降雨事件的發生在相鄰地區並非同時發生，可能受到高空風、平流效應、地表環境及熱力作用等因素所影響。

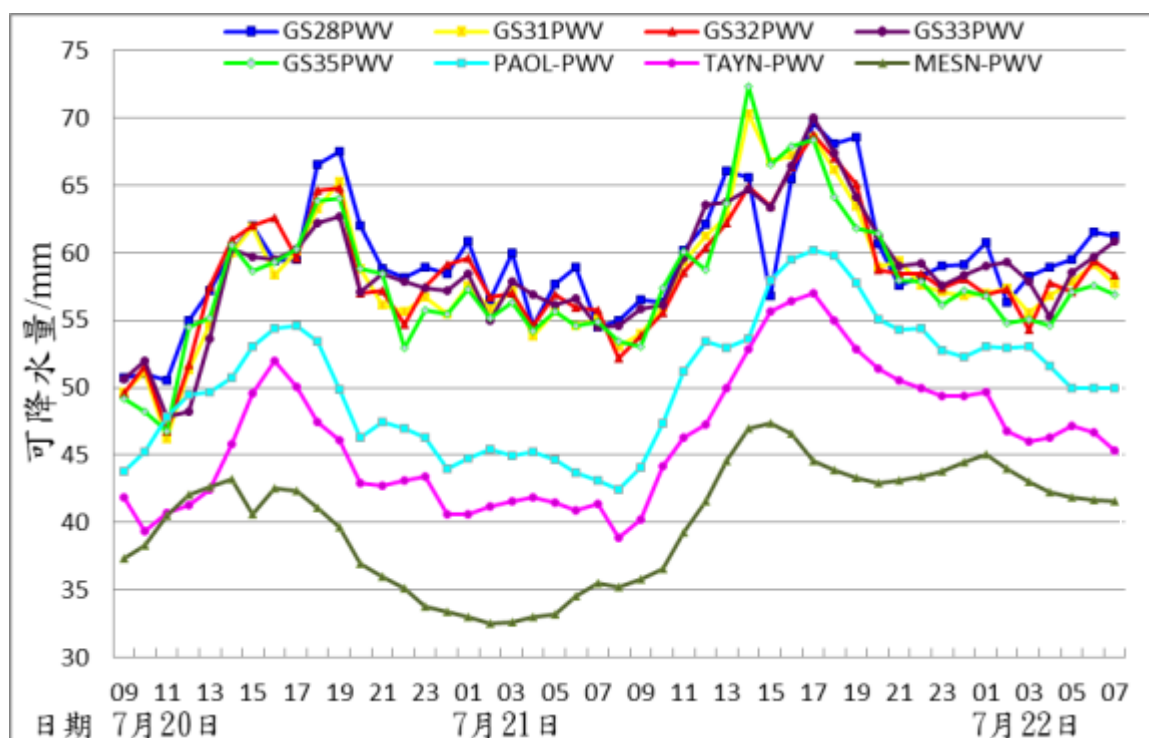


圖 3a. 2010 年 7 月 20-22 日台南地區可降水量時序變化圖

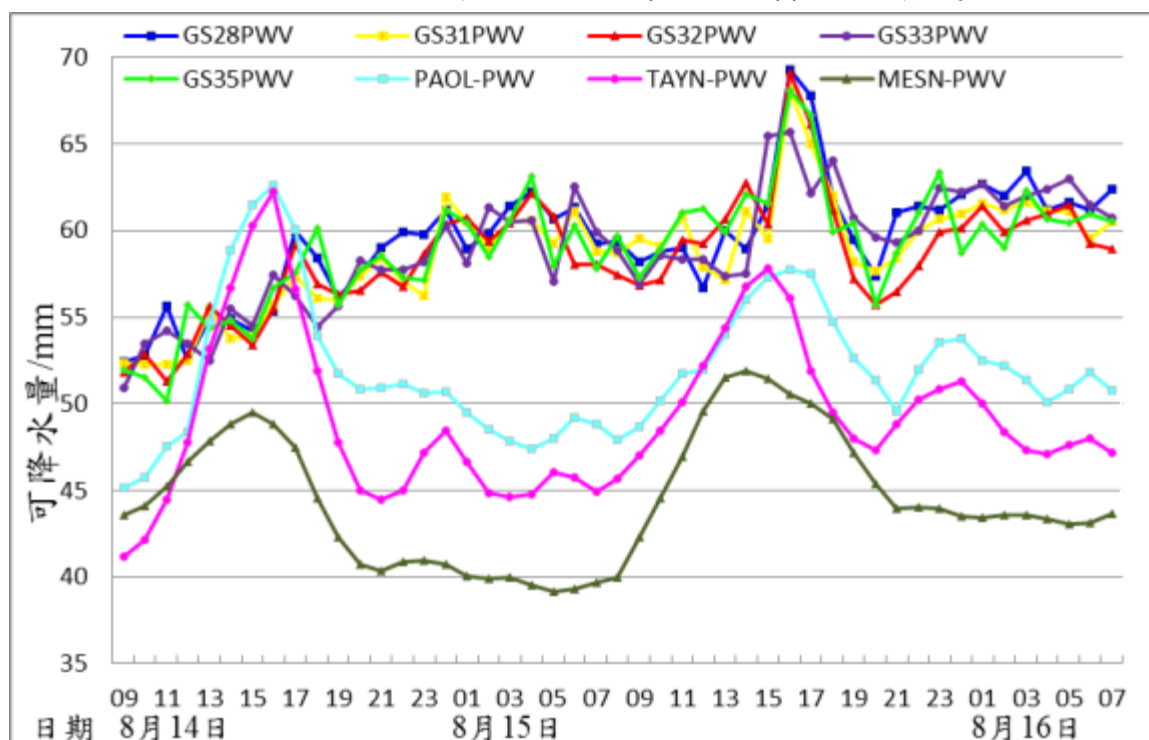


圖 3b. 2010 年 8 月 14-16 日台南地區可降水量時序變化圖

細部分析大氣可降水量與降雨的關係時發現到，降雨發生前大氣可降水量會發生陡升的情況，表示降雨發生前需水氣聚集。另外從累積雨量較明顯處都發生在高可降水量之後如圖 4 及圖 5 所示，因此可證明 GPS-PWV 可顯示發生強降雨前的變化量，換言之可能提

前知道降雨現象發生。另由圖 6 及圖 7 所示可降水量會隨著溫度變化和改變，當溫度上升時可降水量亦隨之上升，經降雨過後延遲量有減少趨勢。但由圖 6 及圖 7 顯示在降雨發生後可降水量確有再度升高的情況，而降雨量並未隨之增加，其所表示的意義可能因發生二次對流使降落至地面的降雨因地表高溫使降水蒸發、散成水氣，而造成可降水量增加之情況或受高空風影響將降雨區吹拂至雨量站以外之地點造成高可降水量而無對應之降雨量，此一現象尚有許多因素造成。因此亦可知造成區域降雨量的多寡，其影響因素眾多，如能在局部地區密集設立 GPS 觀測站及雨量站配合高空風場資訊應可有效掌握與瞭解中尺度降雨與可降水量之間之關係。

表 3a. 7 月 20 至 21 日台南地區各測站大氣可降水量之關係係數

	GS28	GS31	GS32	GS33	GS35	PAOL	TAYN	MESN
GS28	1	0.88	0.92	0.90	0.85	0.66	0.62	0.42
GS31	0.89	1	0.96	0.94	0.97	0.75	0.79	0.55
GS32	0.92	0.96	1	0.93	0.93	0.74	0.75	0.49
GS33	0.90	0.94	0.93	1	0.90	0.75	0.77	0.50
GS35	0.85	0.97	0.93	0.90	1	0.73	0.77	0.55
PAOL	0.66	0.75	0.74	0.75	0.73	1	0.95	0.88
TAYN	0.62	0.79	0.75	0.77	0.77	0.95	1	0.82
MESN	0.42	0.55	0.49	0.50	0.55	0.88	0.82	1

表 3b. 8 月 14 至 15 日台南地區各測站大氣可降水量之關係係數

	GS28	GS31	GS32	GS33	GS35	PAOL	TAYN	MESN
GS28	1	0.94	0.91	0.90	0.90	0.17	0.10	-0.03
GS31	0.94	1	0.93	0.90	0.93	0.15	0.10	-0.02
GS32	0.91	0.93	1	0.81	0.93	0.25	0.23	0.11
GS33	0.90	0.90	0.81	1	0.83	0.16	0.10	-0.02
GS35	0.90	0.93	0.93	0.83	1	0.25	0.24	0.11
PAOL	0.17	0.15	0.25	0.16	0.25	1	0.94	0.71
TAYN	0.10	0.10	0.23	0.10	0.24	0.94	1	0.77
MESN	-0.03	-0.02	0.11	-0.02	0.11	0.71	0.77	1

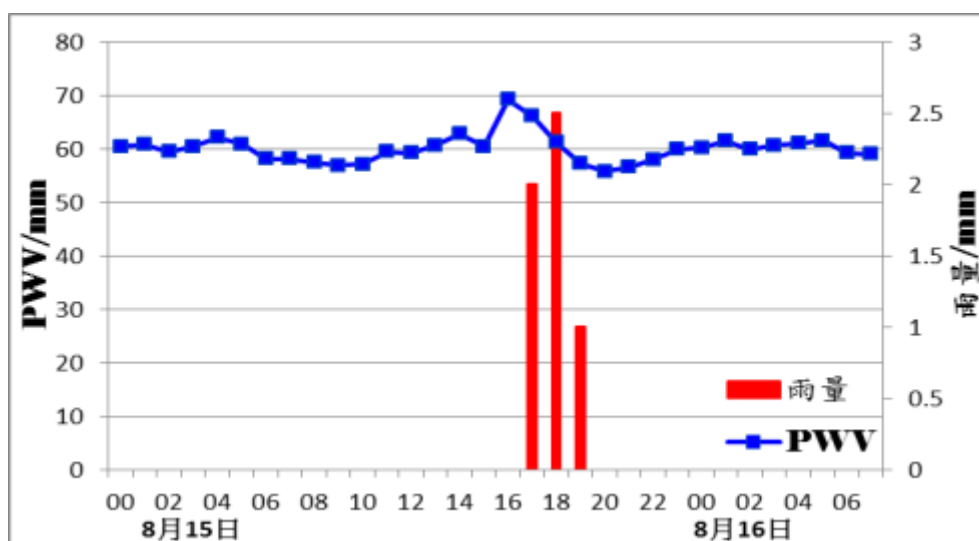


圖 4. 虎頭埤站(GS32)降雨量與可降水量關係



圖 5. 成大航太站(GS35)降雨量與可降水量關係

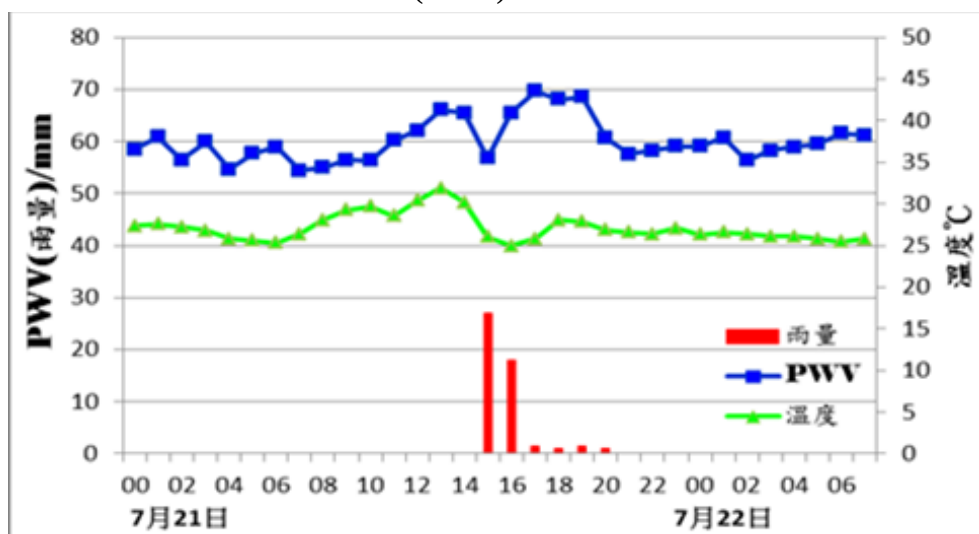


圖 6. 中崙加壓站(GS28)降雨量與溫度及可降水量關係

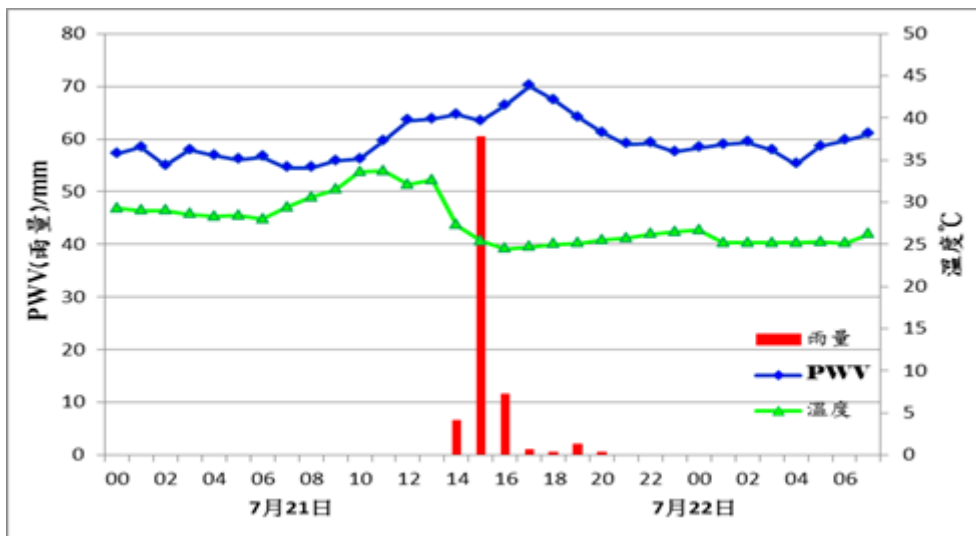


圖 7. 永華國小站(GS33)降雨量與溫度及可降水量關係

由圖 8 歸納出最大可降水量與最大降雨量時間差(Δt)可發現有定量的關係，但與 GPS 及氣象站位置有關，表 4 為 GPS 測站與氣象站之距離，以 GS32 及 GS35 兩測站與氣象站距離皆小於 1 公里為例，其在兩個案之值皆非常接近甚至吻合，且就距離來看距離越近期吻合度愈高，以 GS32 測站為例於最大可降水量發生後 120 分鐘為最大降雨量發生時間，GS35 測站與氣象站距離為 0.8 公里其最大可降水量發生後 60 分鐘為最大降雨量發生時間，而測站距離大於 1 公里以上時，其差異性便非常之大；探究其差異主要受 GPS 測站與雨量站間相對距離過大已超出降雨雲體範圍，而無法反映即時之降雨現象，以本研究之個案為中尺度降雨為例如為單胞雷雨其空間尺度多為數公里以內，如雲體無法同時涵蓋 GPS 測站及雨量站時，將無法同時降落在 GPS 測站及雨量站，且降雨雲體並非皆停滯不動會受高空風所牽引，因此，如圖 9 所示降雨雲體先經過雨量站而後至 GPS 測站附近時其最大大氣可降水量與最大降雨量時間關係將是最大大氣可降水量發生在最大降雨量之後，故欲求的較為精準最大大氣可降水量與最大降雨量的降雨時間差，其 GPS 測站與雨量站的距離不宜過大。

另以 GS32 及 GS35 兩測站之地理位置分析最大降雨與最大可降水量之時間關係，就地形而言 GS32 測站位於虎頭埤風景區該地形高程雖與鄰近區域相近，但接近由於接近丘陵地形，地形高程有較顯著的抬升，而 GS35 測站位於歸仁鄉其地形為平原地形，就對流發展機制而言丘陵與平原除同受熱力作用產生的自然對流外，丘陵地因受氣流沿地形高程被迫抬升而產生強制對流，故其對流機制較僅受熱力作用之平原地區對流強度較強，因此最大可降水量極值發生後，在此可降水量可視同為環境最大可容納的水氣量，其後因空氣

飽和轉為液態降水降落地面，因對流雲內的舉升氣流尚能支撐液態降水，故最大可降水量極值發生時間與最大降雨量發生的時間差將受對流強度影響。因此利用可降水量的數值的變動趨勢，將有助於進行降雨之客觀預報，但 GPS 測站及雨量站空間上的分布仍是影響預報的因子之一。

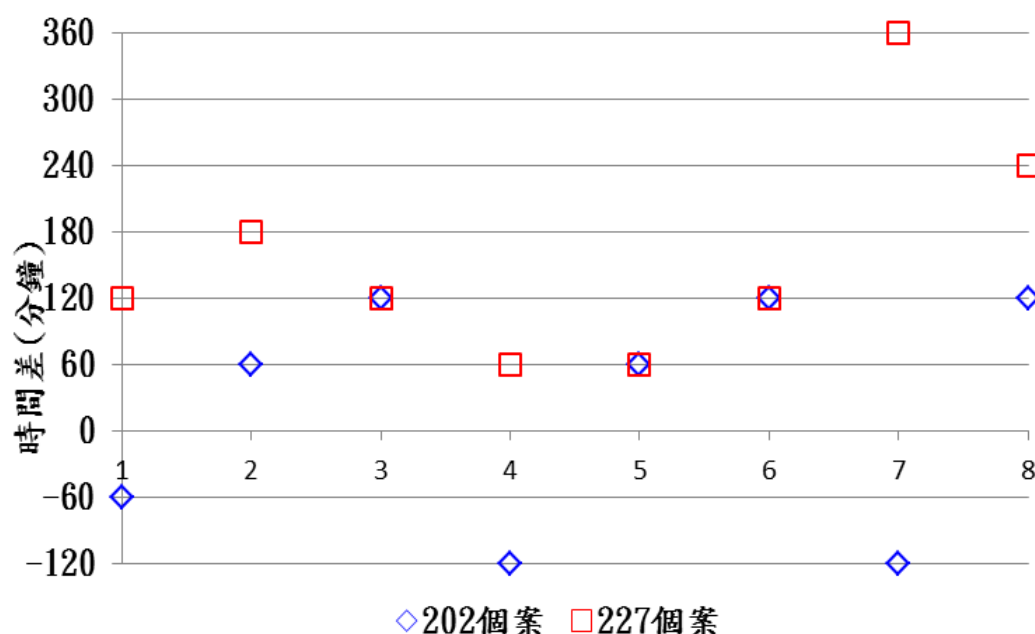


圖 8. 最大可降水量與最大降雨量時間差之散布圖。橫軸 1 表 GS28 測站；2 表 GS31 測站；3 表 GS32 測站；4 表 GS33 測站；5 表 GS35 測站；6 表 PAOL 測站；7 表 TAYN 測站；8 表 MESN 測站。

表 4. GPS 測站與氣象站之距離

GPS 測站	中崙 GS28	西勢 GS31	虎頭埤 GS32	永華 GS33	成大航 太 GS35	寶來 PAOL	桃源 TAYN	梅山 MESN
雨量參考站	台南	媽祖廟	虎頭埤	永康	沙崙	高中	小關山	梅山
相應距離	8km	1.3km	0.4km	3.6km	0.8km	3.2km	4.4km	1.3km

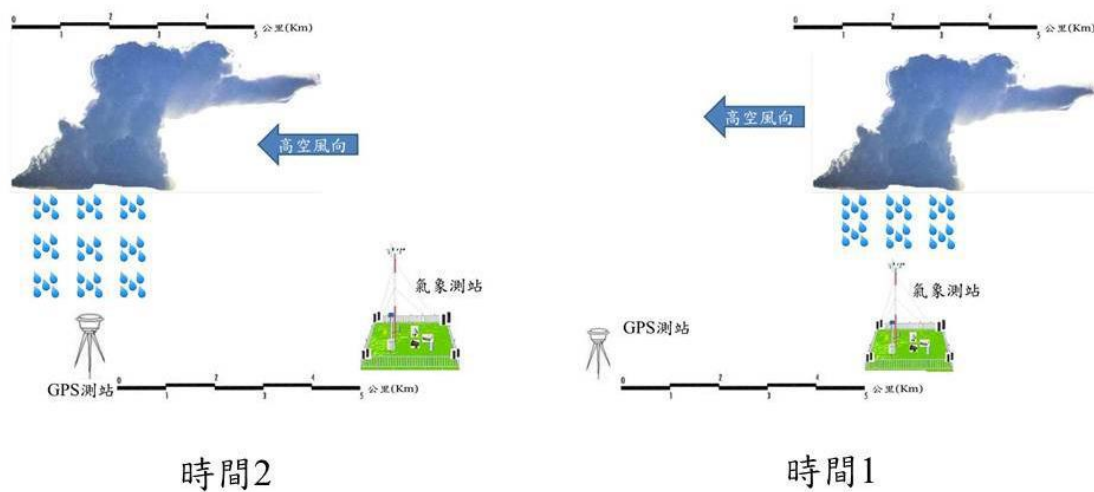
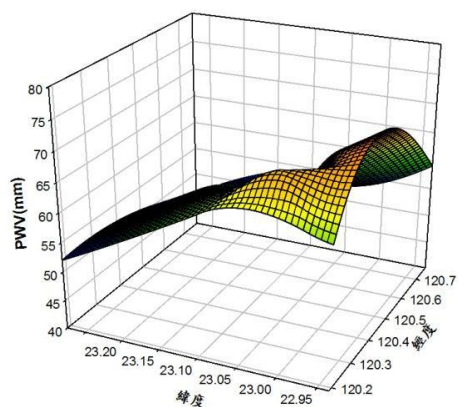
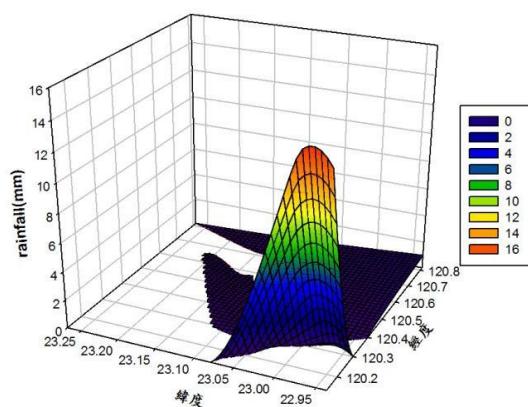


圖 9.降雨雲體先後通過氣象站與 GPS 測站示意圖

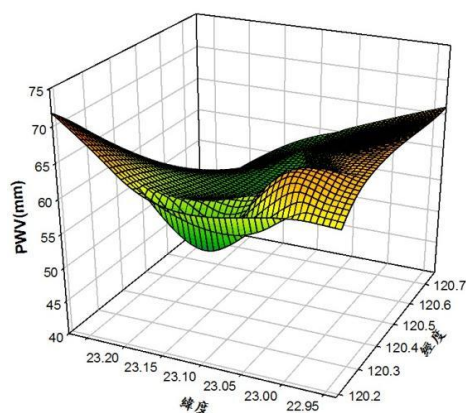
而可降水量與降雨量之間的關係除了時間上的延遲差異外，其空間上的分佈特性也會是影響預報準度的因子之一。為了更清楚的了解可降水量與降雨在空間分佈上的關係，圖 10(時間 7 月 21 日 14~21 時)為一系列針對可降水量與實際降雨間的空間分佈圖，將可降水量當作一個預期驗證指標，則可發現其具有的預測降雨發生區域的能力，就預測方法而論，首先由圖 10(a)7 月 21 日 14 時可降水量空間分佈圖位於北緯 23.25 度，東經 120.2 度之位置附近其可降水量為 50~55mm，於 15 時後即圖 10(c)可降水量上升至 70~75mm，其後 16 時如圖 10(e)可降水顯著下降至 55~60mm，同時於圖 10(f)雨量分佈圖中可發現同一位置雨量顯著增加至 80mm，表示降雨發生前需水氣聚集，在降水同時水氣凝結成降雨，導致水氣迅速下降，因此，由可降水量的變化便可作為一個客觀判斷未來降雨發生的地點與時機的指標。另外我們藉由上述可降水量與降雨量在時間差異上的概念，並將地形因素加入考量，因山區其高程較平地為高，其可降水量受大氣分佈及重力等因素皆小於平地約 5~10mm，故以台南市地形高程相近區域之可降水量圖與 1 小時後實際累積雨量圖進行疊加合成，如圖 11 顯示，在利用差異時間資料疊加後可發現，兩者在空間分佈上的相關性有顯著提升，並可發現其具有的預測降雨發生區域的能力，其累積雨量較明顯處都發生在高可降水量之後，因此，可證明大氣可降水量的區域變化，可提示後續發生降雨之區域。



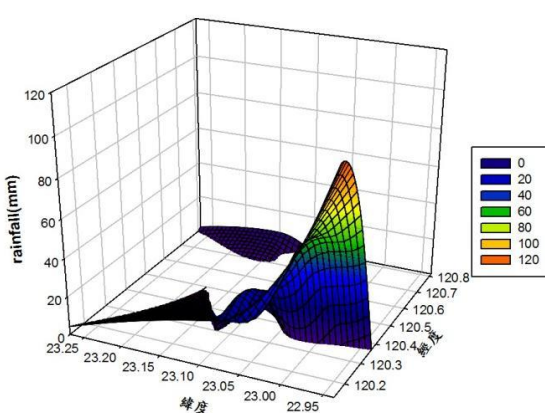
(a) 7 月 21 日 14 時 PWV 分佈圖



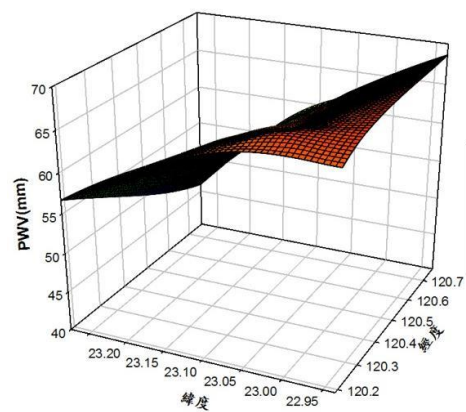
(b) 7 月 21 日 14 時雨量分佈圖



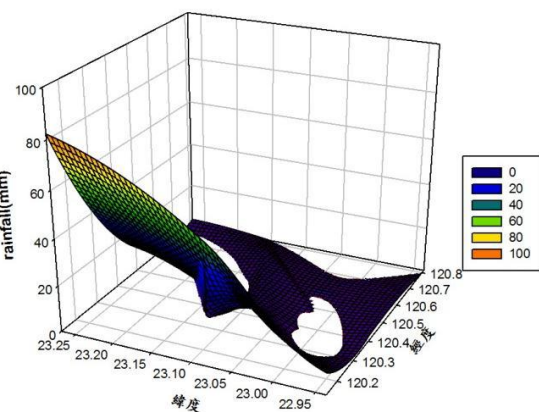
(c) 7 月 21 日 15 時 PWV 分佈圖



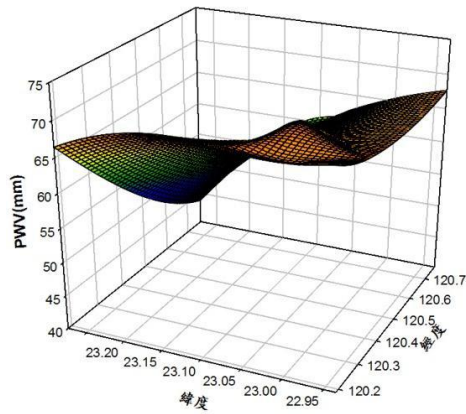
(d) 7 月 21 日 15 時雨量分佈圖



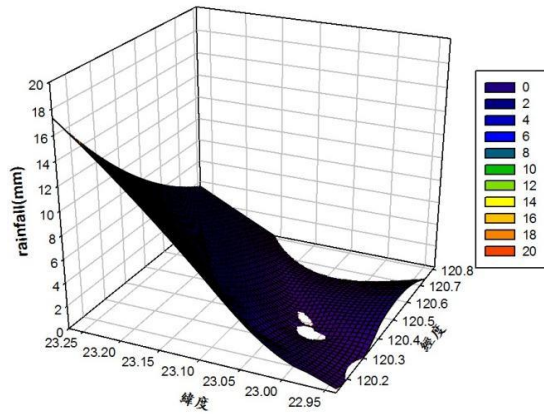
(e) 7 月 21 日 16 時 PWV 分佈圖



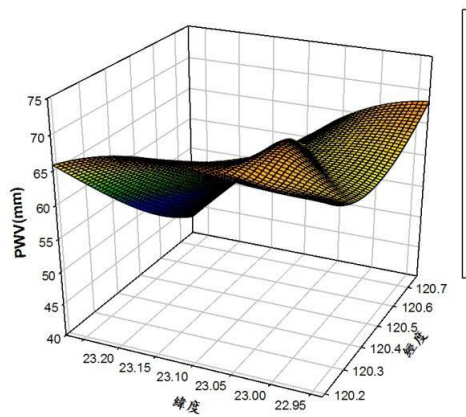
(f) 7 月 21 日 16 時雨量分佈圖



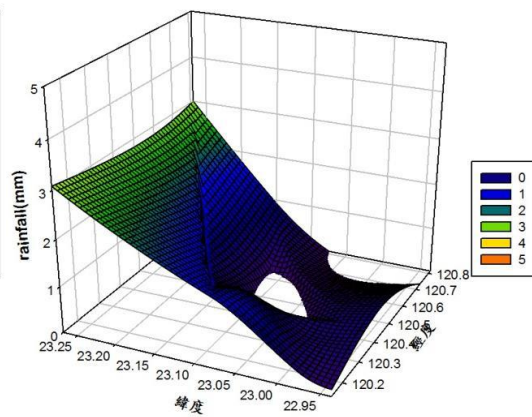
(g) 7 月 21 日 17 時 PWV 分佈圖



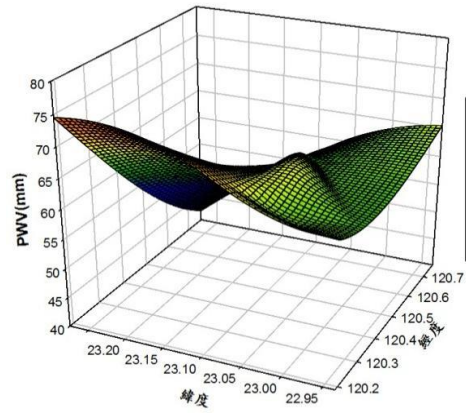
(h) 7 月 21 日 17 時雨量分佈圖



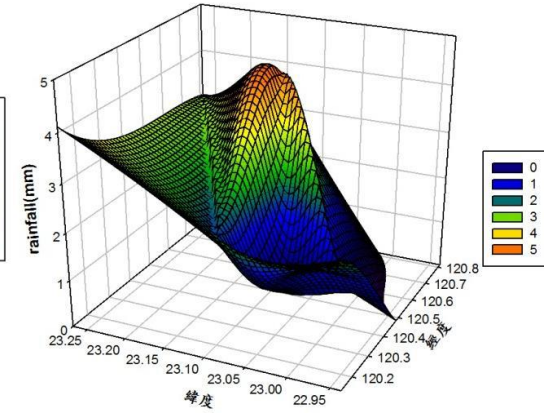
(i) 7 月 21 日 18 時 PWV 分佈圖



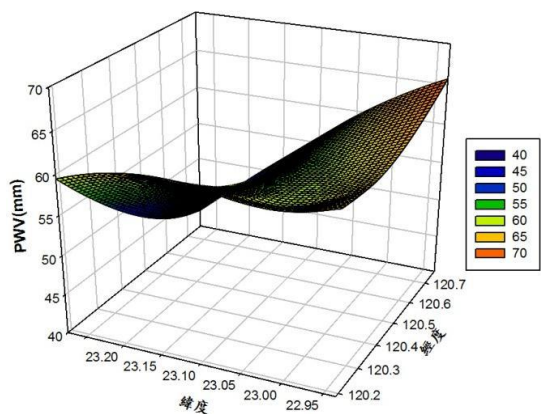
(j) 7 月 21 日 18 時雨量分佈圖



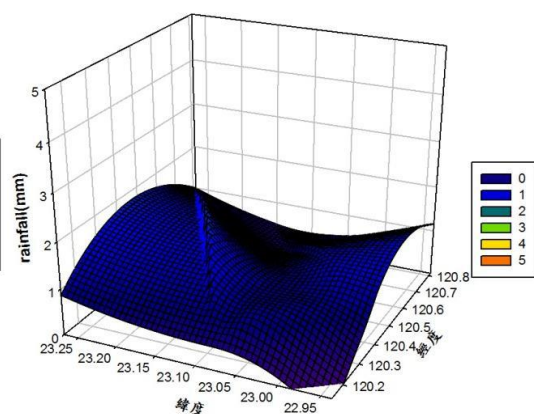
(k) 7 月 21 日 19 時 PWV 分佈圖



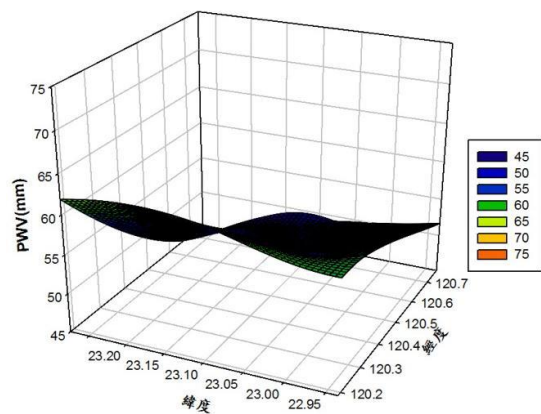
(l) 7 月 21 日 19 時雨量分佈圖



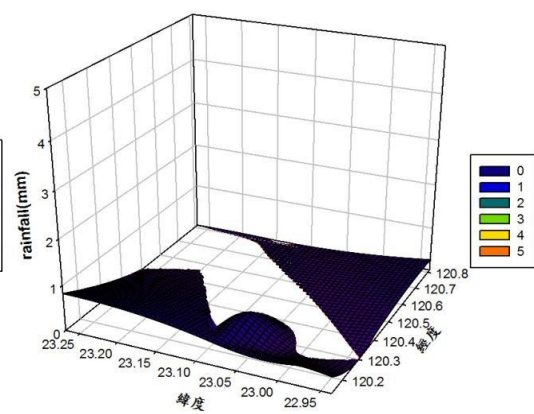
(m) 7月21日20時PWV分佈圖



(n) 7月21日20時雨量分佈圖

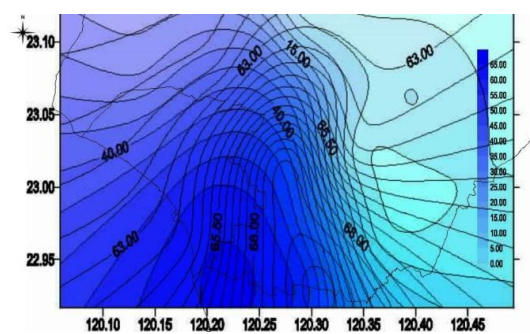


(o) 7月21日21時PWV分佈圖

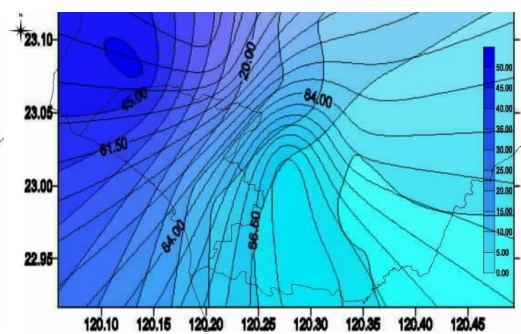


(p) 7月21日21時雨量分佈圖

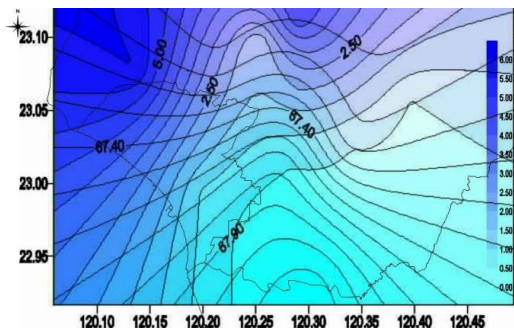
圖10 7月21日14至21時可降水量與實際降雨間的空間分佈圖



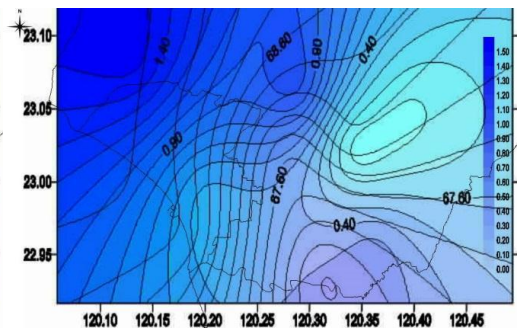
(a) 14時可降水量與15時實際降雨量



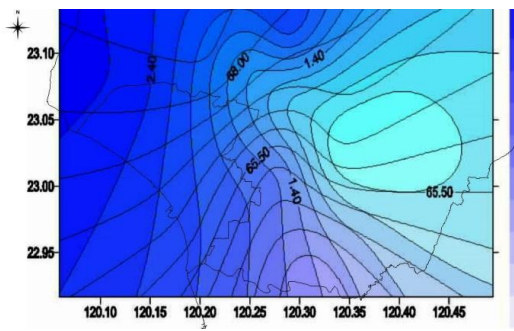
(b) 15時可降水量與16時實際降雨量



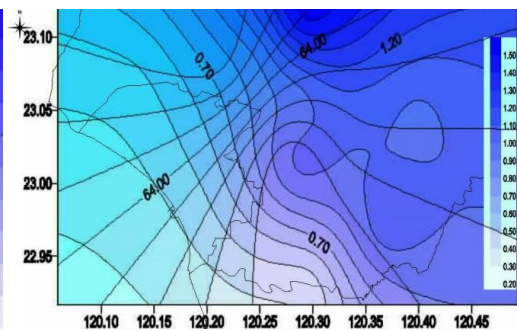
(c) 16時可降水量與17時實際降雨量



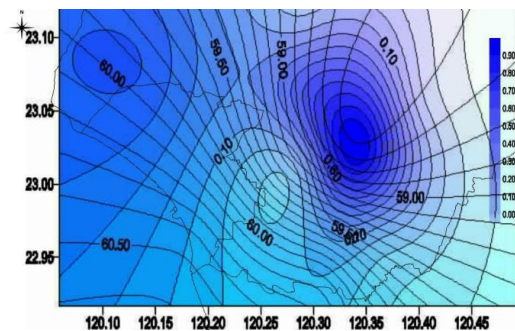
(d) 17時可降水量與18時實際降雨量



(e) 18時可降水量與19時實際降雨量



(f) 19時可降水量與20時實際降雨量



(g) 20時可降水量與21時實際降雨量

圖11 7月21日台南市可降水量圖與累積雨量合成圖

四、結論與建議

本研究數據是以 2010 年 7、8 月之 GPS 觀測資料，藉由 GPS 訊號及雨量站比對數據，以統計量化方式分析數據，了解天氣的狀態，希望對氣象的客觀預報上提供參考的數據，目前就 GPS-PWV 與降水進行比對發現，水氣變化量在降雨發生前約數小時前出現持續且顯著上升的情況，這對於中尺度系統而言為一有利於水氣累積之狀態；而當降雨發生

時溫度、可降水量便開始下降，顯示水氣因飽和後由氣態凝結成液態後降落，因此，大氣中存在高可降水量是降水產生的必要條件。

就統計顯示在相同緯度或相鄰區域在地形條件相同下，其可降水量的時間變化情況有高度正相關，因此如欲利用 GPS-PWV 進行客觀預報時僅須依地形條件挑選測站即可，而本研究顯示可降水量最大值與最大雨量發生的時間差在平原地區約 60 分鐘，而接近地形高程變化抬升地區則為 120 分鐘，顯示對流降雨受地形之影響顯著。

本研究中，GPS 測站與雨量參考站的設置地點，尚有空間距離與資料取樣時間尺度上的差異，因此所統計及比對資料，雖足以顯示水汽含量與降雨的相關性，但數量的精確度，尚難評估。後續研究將選擇適當地點，並且設置共構的 GPS 測站與自動氣象觀測站。針對大氣可降水量與降雨之關係，以及熱力與對流效應進行深入探討。

五、參考文獻

- 呂冠毅，2012，GPS 衛星訊號對流層濕空氣與降水量之關係研究——以台南地區夏季中尺度降水為例，國立成功大學地球科學系碩士論文。
- 劉說安、曾珮莉、王傳盛，2005，近即時 GPS 觀測大氣可降水含量技術之開發，第二十四屆測量學術及應用研討會
- 曾清涼，儲慶美，1999，GPS 衛星測量原理與應用，(第二版)，國立成功大學衛星資訊研究中心。
- 葉大綱、蕭棟元，2012，地基 GPS 衛星資料處理與分析，交通部中央氣象局委託研究計畫成果報告。
- Bauersima I., 1983, NAVSTAR/Global Positioning System(GPS) II, diointerferome-trische Satellitenbeobachtungen. Mitteilungen der Satelliten-Beobachtungsstati-on Zimmerwald, Bern, vol. 10.
- 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 precipitable water. Journal of Applied Meteorology, 33: 379-386.
- Bevis, M., S. Businger, T. A. Herring, C. Rocken, R. A. Anthes, and R. H. Ware, 1992. GPS Meteorology: Remote sensing atmospheric water vapor using Global Positioning System. Journal of Geophysical Research, 97(D14): 15787-15801.
- Businger, S., S. R. Chiswell, M. Bevis, J. P. Duan, R. A. Anthes, C. Rocken, R. H. Ware, M. Exner, T. van Hove, and F. S. Solheim, 1996. The promise of GPS in atmospheric monitoring. Bulletin of the American Meteorological Society, 77: 5-18.
- Davis, J.L., T.A. Hering, I.I. Shapiro, A.E. Rogers and G. Elgered, 1985, Geodesy by radiointerferometry:effects of atmospheric modelling errors on estimates ofbaseline length, Radio Sci., 20, 1593-1607.

- Duan, j., et al., 1996, GPS meteorology : Direct estimation of the absolute value of precipitable water, *J. Apple Meteorology.*, 35, 6, 830-838,.
- Leick, A. (2004), *GPS satellite surveying*, Wiley.
- Liou, Y. A., and C. Y. Huang, 2000, GPS observations of PW during the passage of a typhoon, *Earth Planets and Space*, 52(10), 709- 712.
- Niell, A. E., 1996, Global mapping functions for the atmosphere delay at radio wavelengths, *Journal of Geophysical Research- Solid Earth*, 101(B2), 3227- 3246.
- Thayer, D., 1974: An improved equation for the radio refractive inde of air. *Radio Sci.*, 9, 803-807.
- Rocken, C., J. M. Johnson, R. E. Neilan, M. Cerezo, J. R. Jordan, M. J. Falls, L. D. Nelson, R. H. Ware, and M. Hayes, 1991, The Measurement of Atmospheric Water- Vapor - Radiometer Comparison and Spatial Variations, *IEEE Transactionson Geoscience and Remote Sensing*, 29(1), 3- 8.
- Rocken, C., van Howe T, et al., 1995, GPS/STORM:GPS sensing of atmospheric water vapor for meteorology. *J Atmos Oceanic Techn*, 12:468-478.
- Rocken, C., R. Anthes, M. Exner, D. Hunt, S. Sokolovskiy, R. Ware, M. Gorbunov, W. Schreiner, D. Feng, B. Herman, Y.H. Kuo, and X. Zou, 1997, Analysis and validation of GPS/MET data in the neutral atmosphere. *J. Geophy. Res.*, 102, 29849-29866
- Saastamoinen, J., 1972, Atmospheric correction for the troposphere and stratosphere in radio ranging of satellites. In the use of artificial satellites for geodesy, *Geophys. Monogr. Ser.* edited by Henriksen SW et al, 15, 247- 251.
- Saastamoinen, J., 1973, Contributions to the theory of atmospheric refraction, *Bulletin Géodésique*, 47(1), 13- 34..
- GAMIT-GLOBK, <http://www-gpsg.mit.edu/~simon/gtgk/>
- GOOGLE EARTH , [http : //earth.google.com](http://earth.google.com)