

# 中正都普勒雷達對臺灣北部地區 降水系統雨量之估計

王意郎 陳台琦 林沛練

國立中央大學大氣物理研究所

## 一、前言

### 1-1. 使用雷達回波估計降水的回顧及困難

由於氣象雷達可提供即時大範圍降水觀測資料，因此對於產生大量降水之天氣系統如颱風雨、雷雨、鋒面雨、梅雨、中尺度對流系統等降水雨雲都可做十分詳細的降水量估計，但不同的天氣系統、降水形式、地形、及雷達規格，造成回波強度與地面降雨量之間的關係也須因應各種情形而加以修正。

早期針對每一個雷達做 Z-R 統計分析，當雨量站 (rain gauge) 過於稀疏時，無法由雨量站估計整個流域 (watershed) 的雨量，而從雷達回波公式及降雨量之基本定義，即可導出回波強度係數 (reflectivity factor Z) 與降水率 (rainfall rate R) 之關係式；即  $Z=aR^b$ 。在過去 20 年，如何求得適當之 Z-R 關係式，一直是以雷達測量降水最困難的工作。目前最常採用之雷達降雨估計即是採用  $Z=200R^{1.6}$  來計算，此公式是根據 Marshall and Palmer (1948) 所提出在層狀雲 (stratiform) 降水雨滴分佈推導出來的，但如將此式應用於其他類型降水，如對流性降水、地形雨等降雨量估計的誤差達 200% 以上，這將減低雨量估計的參考價值。因此在改善雷達降雨量估計方面有幾個不同的方向，早期根據分類統計的方式，將不同地區，不同形式的雨加以分類，再長期收集地面雨量觀測資料與雷達降水量做長期氣候統計回歸，尋取經驗式，全世界各地及各型雨之 Z-R 關係可參考 Battan (1973)。

Brandes (1974, 1982), Wilson (1970) 根據 Z-R 關係式求取的困難，提供另一種觀念，即是隨時以雷達資料與雨量測站的資料合併使用，校正雷達的降雨估計，此種方法採用了雷達大範圍降水之分佈 (distribution) 及雨量站之正確雨量大小 (magnitude) 彼此配合，而將估計之正確性大為提高，誤差約為 20% ~ 30% 左右，從最早的單站校正 (single station) 到面積平均校正 (area average) 到 1974 年提出的“雷達降水分佈最佳化技巧”都是運用同樣的觀念，此種方式揚棄了 Z-R 經驗式，使用客觀分析的技巧，直接從資料中彼此校正，可以包容所有雨量估計之變化性。

### 1-2. 研究方向及目的

臺灣地區目前尚未有不同降水型態的 Z-R 關係統計資料，而在有關此方面的研究，偏向於使用客觀分析方法，直接將地面雨量測站降水資料來校正雷達估算的降水資料，此種方法稱為雨量最佳估算法。陳、等 (1988)，祝、等 (1991)，蘇、等 (1992)，陳和許 (1992)，均以此方法為出發點。

最近在 TRMM 計劃推動下，以雨滴譜資料及雷達資料用 PDF 方法求取 Z-R 關係式 Short (1990)，而仍在平行地進行中的也有以雙偏極化及雙波長雷達企圖直接求取 Z-R 關係式，以得到正確的雨量估計。

本文主要針對中正雷達及北部自動雨量網來做雷

達雨量估計之研究，雖然 Z-R 有許多之變化因子，北部也仍有起伏之丘陵，但是為了要估計雨帶移入內陸後預報雨量之依據，本研究將朝求取一合理之 Z-R 關係而努力，並期了解地形在降水系統移入後扮演之角色。

## 二、資料來源及處理

### 2-1. 資料來源

本文針對臺灣地區梅雨季節的豪雨個案為分析對象，所分析個案的時間為 1989 年 5 月 28 日到 1989 年 5 月 30 日。資料分為中央氣象局北部自動雨量測站資料，及中正氣象臺都卜勒雷達回波強度資料兩部份。

### 2-2. 資料處理

本文首先做統計上的 Z-R 線性回歸，即採雨量最佳化分析，其分析過程前必須就中正雷達回波資料和氣象局雨量測站資料兩者的特性及其限制進行了解，並尋找最佳的資料利用及分析。

處理過程步驟如下：

(1) 首先將中正雷達資料內差至三維網格上 (120×120×4)，每點水平間隔為 1 km，垂直間隔為 0.5 km，分成 0.5 km、1.0 km、1.5 km、2.0 km 高度四層。(圖 1) 顯示雷達資料分析範圍及雨量站所在位置。

(2) 再將氣象局雨量站所在之地理位置 (包括 X, Y, Z 方向) 以每 1 Km 為單位之直角座標予以定位，理論上所得每個雨量站之降水率對應於雷達掃過它時之回波值。

(3) 從步驟 2. 發現兩個問題：

A. 雨量站不會剛好落在網格點上，所以必須取某一範圍內之回波值的平均值，而所取面積即“測試面積”，亦即該取多大範圍內的回波平均值才能充分表現出雨量站之降水率特性。

B. 雨量站所在的高度不同，加上地形之影響如 (圖 1)。如果嚴格要求取得雷達回波值之高度一定和雨量站高度相同，因中正雷達 Doppler Mode 已經過去除地形回波的處理 (風場很小，回波很強即視為地形回波)，但未完全處理乾淨，所以常常得到很低 (本文中回波值小於 0 者一律給 0)，或很強的回波值。因此，何種高度的回波值才是雨量站降水率的最好反應取決於回波值在垂直方向之分佈。

(4) 在擇取測試面積方面選擇的測試面積為九平方公里，即某一特定點的回波值是以 16 點回波值之平均值取得。但若值為 (-99) 表示機器故障或未運轉則不做平均，但若為 0 則仍拿來平均。

(5) 至於雨量測站某一特定時間的降水率取得和我們“測試面積”所取的範圍大小、系統移動速度、雨滴終

端速度、雷達回波取得時間等.....有關。

本文中所採用的平均降雨率，係以雷達回波所定的時間其前後各10分鐘的平均雨量。

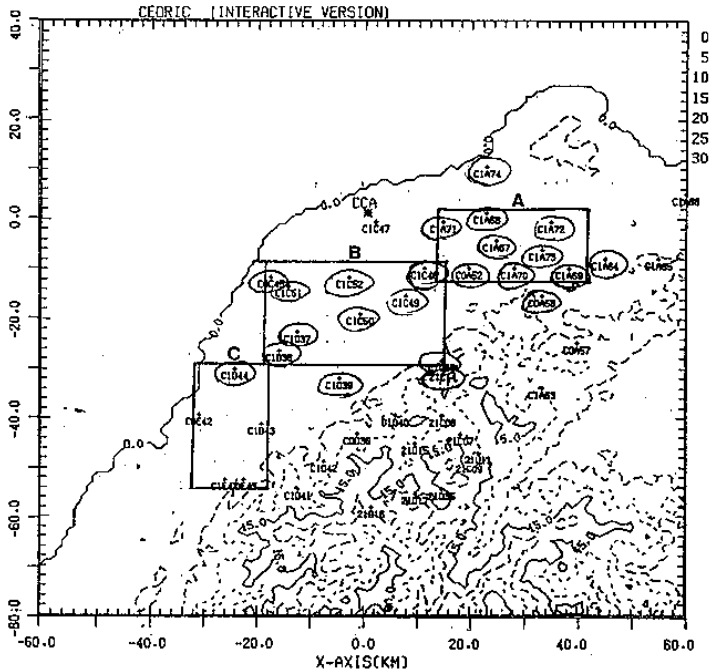


圖1. 氣象局北部地區之自動雨量測量站，及相對中正雷達所在之地理坐標圖。此外因分析需要將測站區分成A, B, C三區，而括號的23站為進行P.D.F所選的測站。

### 三、P. D. F. 方法介紹及其應用

在我們初步尋找Z-R關係式的結果，可參考陳、林(1991, 1992)，係由雷達資料為網格點，然後再將雨量資料利用客觀分析和線性外插的方法，轉換成雨量的網格資料，俾能和雷達資料做點對點的對應，來求取彼此的關係。但在實際運作中，Z-R的關係並不如預期中有一線性關係存在，大多數都極為散亂，即使經過挑選後的測站再做線性回歸，情形也不是很理想。

因此我們嘗試以另外一種方法進行亦即P. D. F. (Probability Density Function) 方法。

#### 3-1. P. D. F. 方法介紹

此種藉由統計觀念出發的模式，乃是完全忽略某一時刻雷達回波值與平均降雨率的對應關係，直接由某一個案時間內所有雷達回波值之機率分佈，與所選定雨量網內所有測站的雨量值之機率分佈做一對應，亦即純粹由巨觀的方式找出彼此關連，而不受限於時空無法對應精確的困擾。

其實際分析步驟如下：

- (1) 將所選擇的個案時間內所有的dBZ值，以縱坐標為機率，橫坐標為dBZ值，然後繪製其機率分佈圖。
- (2) 再將此個案時間內，所有雨量測站的平均雨量R轉換成 $10\log R$ (dBR)之後，以縱坐標為機率，橫坐標為dBR值，然後繪製其機率分佈圖。
- (3) 然後將這兩個長條圖由最末端，按照其佔5%，10%，15%.....，95%的dBZ值和dBR值對應至dBZ-dBR的關係圖上。
- (4) 求此dBZ-dBR圖中的斜率(b值)，及截距( $10\log a$ )。

根據上述的分析步驟，針對1989年5月29日個案，中正雷達回波資料共92個時間(5290013~5302313)，及43個地面測站進行分析。

(圖2)為以1~2Km三層的平均回波場，得到的回波強度比率分佈圖、降雨率強度分佈圖、及線性回歸圖。而得到各層的Z-R關係式分別為：

|                |                     |
|----------------|---------------------|
| 0.5Km 高度       | $Z = 2.13 R^{1.68}$ |
| 1.0Km 高度       | $Z = 3.34 R^{1.78}$ |
| 1.5Km 高度       | $Z = 6.38 R^{1.64}$ |
| 2.0Km 高度       | $Z = 8.39 R^{1.57}$ |
| 1.0~2.0Km 三層平均 | $Z = 5.77 R^{1.66}$ |

由以上初步的結果顯示，P.D.F.方法可以得到較合理的關係式，特別是b值均大於1，符合我們的希望，但a值均太小。

在此同時本人發現，43個測站中有很多測站並無降雨資料，或部份測站上空回波值均很小或無資料(此表示有地形影響中正雷達予以濾除)。

而本人又認為，每一個強降水個案中一定有屬於對流降水及層狀降水的時段，如果混在一起統計，必定造成得到的公式，無法得到真正降水特性的預估，即會發生對流降水低估，而層狀降水卻高估的情形。為得到較佳的Z-R關係式，本人認為必須更仔細的區分出不同降水特性的時段，及篩選出較佳、沒有過多錯誤資料的測站，來進行P.D.F.統計才較有意義，結果也應較佳。

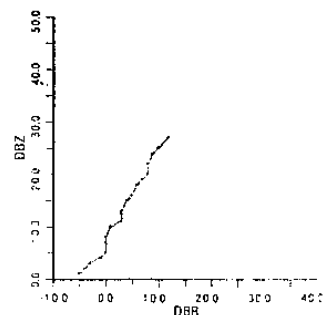
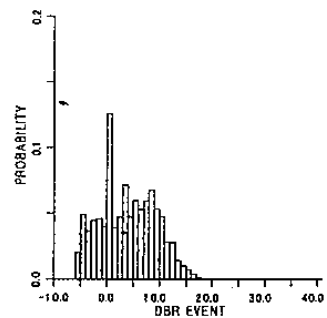
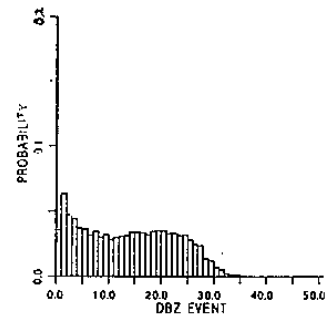


圖2. 1989年個案92個時間43個測站回波場以1~2Km三層平均，所得之回波、雨量機率分析圖及線性回歸圖。

### 3-2. 進行 P. D. F. 方法前測站的選擇

(1) 陳、林(1991, 1992)初步的結果顯示偏遠測站結果不佳, 因此在做此方法分析之前, 所選的測站以距離雷達 60Km 內為主。

(2) 對於山區雨量測站, 回波受到地形干擾, 回波嚴重污染, 雖然中正雷達有濾除雜波的步驟, 但並不乾淨徹底。因此位於山區的雨量測站資料一概不予統計處理- 以超過 500m 為準。

(3) 雖然經過上述的測站篩選, 但仍有部份測站雨量資料錯誤過多或無觀測值過多, 此均必需以人為的方式檢核, 然後予以避免使用。經由上述篩選過程各個案所選分析的測站如(圖 1)中括號所示, 共 23 站。

### 3-3. 進行 P. D. F. 方法前各個案時間的選定

根據張(1992)所做的綜觀天氣分析知道, 本個案梅雨鋒面移入臺灣北部的時間大約在 29 日上午 4、5 點左右, 而以 6 點到 10 點間, 北部地區有豪雨出現, 之後雨勢變小且持續不斷, 直至 1830 以後才轉為雨勢不明顯, 爾後在第二天即 30 日有週而復始的情形。

本人首先就選定的 23 個測站, 回波資料由 29 日 0513 到 30 日 0543, 23 個測站相對於回波資料時間的平均降雨率進行了解, 國外學者通常以 5~6 mm/hr 的降雨率來區分對流性降水及層狀性降水, 因此本個案的分析採:

A. 平均降雨率大於 5mm/hr 的時段 29 日 0513~1843

。

B. 平均降雨率小於 5mm/hr 的時段 29 日 1913~ 30 日 0543。

兩個時段分別統計分析。

### 3-4. P.D.F. 方法中回波場高度的擇取

(1) 在回波場高度的選定: 分別以 0.5Km、1.0Km、1.5Km、2.0Km, 四層的回波值各別和雨量測站資料做 Z - R 線性回歸, 查看垂直高度上可否有明顯的差異。

(2) 由下一節的結果討論中得知, 避開較不佳的 0.5Km 資料, 本人再以 1.0Km ~ 2.0Km, 三層的平均回波值再和雨量資料進行 Z - R 線性回歸統計, 其中若有某一層或某二層無資料, 則不列入平均。

### 3-5. P.D.F. 線性回歸後的結果與討論

經由 P.D.F. 方法步驟 1 ~ 4; 我們可以得到 dBZ 回波比率分佈圖、dBR 雨量比率分佈圖及兩者的線性對應圖, 本文僅列出各選定時段 1~ 2Km 平均回波值所得到的關係圖如(圖 3, 圖 4)所示。而各個案不同時段不同高度回波值所線性回歸後的 Z - R 關係式。

A. 平均降雨率大於 5mm/hr 的時段:

0.5Km 高度  $Z = 0.94 R^{1.80}$

1.0Km 高度  $Z = 7.13 R^{1.43}$

1.5Km 高度  $Z = 8.15 R^{1.43}$

2.0Km 高度  $Z = 5.85 R^{1.55}$

1.0~2.0Km 三層平均  $Z = 6.93 R^{1.47}$

B. 平均降雨率小於 5mm/hr 的時段:

0.5Km 高度  $Z = 10.80 R^{1.51}$

1.0Km 高度  $Z = 31.60 R^{1.61}$

1.5Km 高度  $Z = 38.00 R^{1.44}$

2.0Km 高度  $Z = 40.70 R^{1.49}$

1.0~2.0Km 三層平均  $Z = 35.30 R^{1.48}$

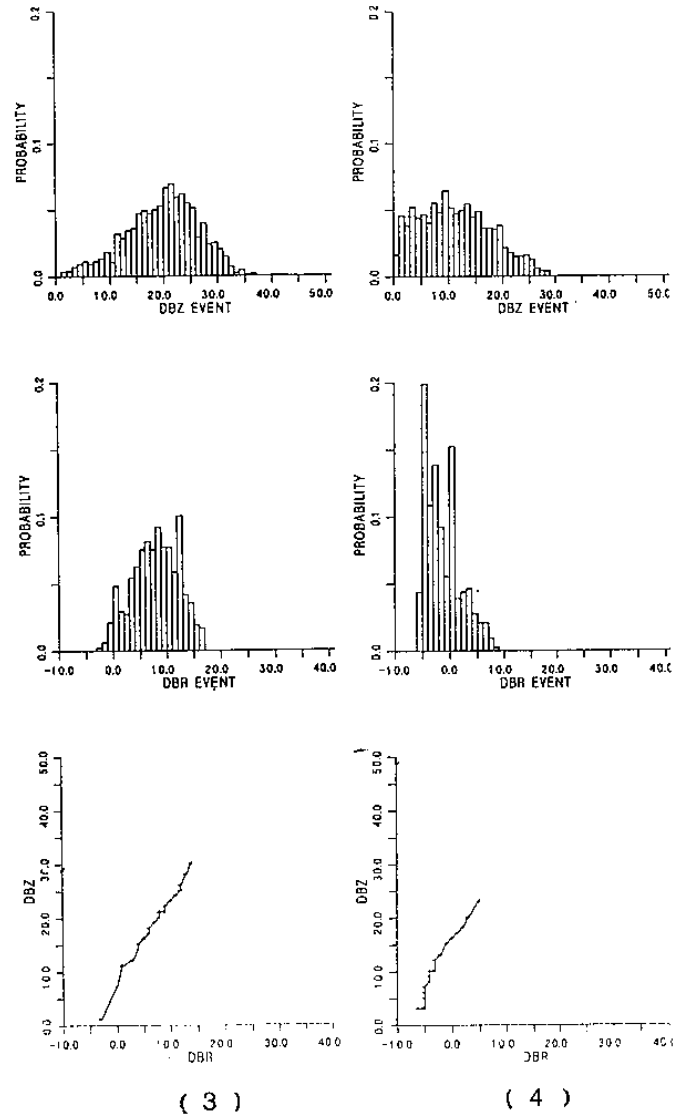


圖 3. 1989 年個案平均降雨率大於 5mm/hr 所得之回波、雨量機率分析圖及線性回歸圖。

圖 4. 1989 年個案平均降雨率小於 5mm/hr 所得之回波、雨量機率分析圖及線性回歸圖。

以下為進行本方法分析過程的心得與結果討論:

(1) 平均降雨率係取回波時間前後 10 分鐘予以平均, 而當平均降雨率小於 1mm/hr 時所得到的 dBR 值便出現負值, 而太小的平均降雨率可信度偏低。

此外在(圖 2、3、4)中 dBR 的機率分佈圖中均可發現的 dBR 為 0 的值亦偏高, 此因素除了“真的無降水”外, 如果錯誤資料也一律給 0 值。

因此在線性回歸取 a, b 值時主要針對 dBR 大於 0 的部份, 以免過多的不好資料影響結果。

(2) 針對平均降雨率大於 5mm/hr 時段的 P.D.F. 分析中, 可發現其中仍有很多屬於層狀降水(小於 5mm/hr)的時間樣本; 即降水過程中對流雨胞夾雜著層狀降水, 因此要強制規定得到完全為對流雨帶降水的 Z - R 關係式, 是有些困難。

(3) 分析中 1.0Km、1.5Km、2.0Km 三層所得到的 Z - R 關係式結果大致接近。此表示在這個案中, 高度場 1.0Km、1.5Km、2.0Km 的回波變化不大。

而0.5Km回波值得到的結果，則和其它三層有明顯的差異，探究其原因在於回波值偏低；而導致回波偏低的原因可能在於地形雜波過多，中正雷達予以濾除，故回波值較其它三層為低。

(4) 在P.D.F.方法線性回歸後我們得到的關係式，b值大約在1.5左右，(國外學者所得到的經驗式 $a \in (50, 400)$ ， $b \in (1.2, 1.8)$ )已接進我們預期要求的目標。

(5) 雖然我們得到的a值偏小，但在不同降雨特性時段的結果，我們亦發現對流性降水愈明顯則a值愈小，而愈屬層狀降水得到的a值愈大。

此結果a值雖然和國外所得的經驗式a值比較有過小之情形，但結果應還算良好，因為不同區域、不同地理環境條件，結果自然有所差異，而且不同雷達其硬體特性亦不盡相同。

以上述同樣方法過程我們亦對1990年6月9日個案做一分析比較，根據鄧(1992)所做的綜觀天氣分析知道，本個案為一雨勢強烈、降雨時間較短的個案，經其仔細分析發現本個案雨帶具有中尺度對流雨胞組織。

A. 平均降雨率大於5mm/hr的時段：  
1.0~2.0Km三層平均  $Z = 3.20 R^{1.47}$

B. 平均降雨率小於5mm/hr的時段：  
1.0~2.0Km三層平均  $Z = 67.00 R^{1.14}$

最後將P.D.F.方法得到較佳結果的1989年、1990年Z-R關係式和國外的經驗式做一比較，如(圖5)所示。

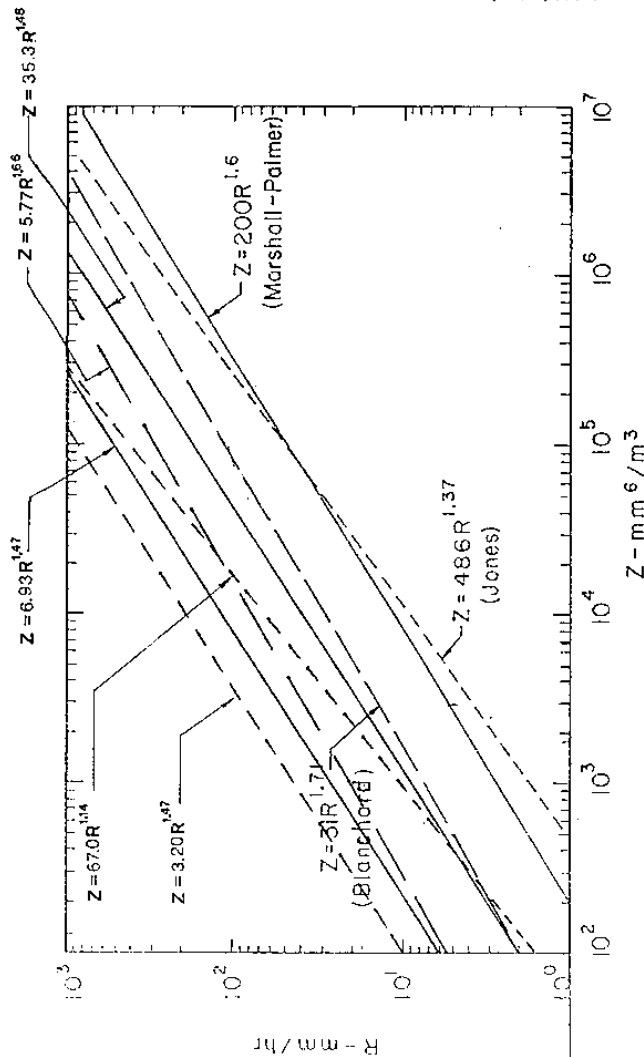


圖5.1989年、1990個案P.D.F.方法所得不同時段的Z-R關係式和國外經驗式之比較圖。

#### 四、P.D.F.結果校驗其降水估計之準確性

經由前幾章節中尋找Z-R關係式的兩種方法，其得到的結果，本人認為以P.D.F.方法所得到的結果較為合理。但如果以所得到的Z-R關係式，代入原有的回波值反求雨量，那和真實的雨量測站測量值比較，其結果好不好呢？兩者的差異又有多大，是高估或偏低呢？

此外本人亦對各雨量測站相關性好壞有興趣，是否其結果因區域不同而有所差異，此種比較均可以做為Z-R關係式的修正依據。

因此本人在所有的測站中選擇三個區域如(圖1)所示，其中

- A. 區：本區域位於臺北地區，包含的測站共八站。
- B. 區：本區域位於桃園地區，包含的測站共十站。
- C. 區：本區域位於新竹地區，包含的測站共五站。

##### 4-1. 各單站結果討論

本個案1843以前的時間，平均降雨率大於5mm/hr，我們以 $Z=6.93 R^{1.47}$ 估計，而1843以後則以 $Z=35.3 R^{1.48}$ 估計。我們得到各單站測量的累積雨量值及估計值，並計算出兩者的相關性如(表1)所示。

在(表1)中我們可以明顯發現以下幾個特點：

1. 地形高於500m的山區雨量測站，回波估計得到的雨量值，全部明顯偏低此表示山區受地形雜波影響，我們並無法由1~2公里的平均回波場得到合理的估計值，必須再往更高層尋找，因中正雷達可能對山區低層回波均予以濾除，或有其它影響山區降水的因素存在。
2. 以整個估算時間，我們發現平均降雨率大於5mm/hr的時段(5290543 ~ 5291843)，普遍而言結果尚佳，而加入平均降雨率小於5mm/hr時段(5291843 ~ 5300543)的估計以後，整個統計時間相關性則更為提高，此即說明含對流雨胞的降水過程較難精確估計，而小雨時段由於公式反求後的雨量變化並不大，估計值接近測量值，因此結果較佳。
3. 個別單站中具有最佳相關性，且估算雨量最接近測量雨量的單站以C區比率最高。
4. 發現有一些單站估算值和測量值很接近，但卻無良好的相關係數，此表示回波和雨量的時空配置不佳。
5. 估計雨量值偏高或偏低的測站參半，而且並無區域性。

##### 4-2. 以區域測試結果及討論

決定以此步驟來校驗P.D.F.方法的好壞，主要是單站的回波值和降雨率其時間-空間的配置實在不是很好。

因此本人即想到是否以一固定範圍內，所有測站同一時間，回波所估計的雨量值再予以平均，然後再和所有雨量測站測量值平均比較，查看兩者之間結果是否有所改善。

我們針對進行P.D.F.的23站及A.區、B.區、C.區四部份進行比對工作，所得到的結果如(圖6~9及表2~5)所示。

| TIME |          | 5290543--5291943 |       |       | 5290543--5300543 |       |       |
|------|----------|------------------|-------|-------|------------------|-------|-------|
|      | STOP     | R1               | R2    | CORR. | R1               | R2    | CORR. |
| C    | 1 COA58  | 77.7             | 90.1  | 0.520 | 89.7             | 96.6  | 0.640 |
| B    | 2 COE42  | 172.6            | 132.1 | 0.632 | 179.4            | 142.5 | 0.714 |
| B    | 3 C1C52  | 141.1            | 85.2  | 0.684 | 149.4            | 91.1  | 0.765 |
| C    | 4 C1D43  | 147.3            | 174.9 | 0.825 | 159.9            | 185.4 | 0.845 |
| A    | 5 C1A67  | 93.9             | 99.8  | 0.515 | 103.7            | 112.9 | 0.642 |
| **   | 6 C1A63  |                  |       |       |                  |       |       |
| B    | 7 COC45  | 133.7            | 101.8 | 0.173 | 138.6            | 107.5 | 0.391 |
| C    | 8 C1D44  | 141.5            | 159.6 | 0.494 | 147.2            | 169.8 | 0.630 |
| B    | 9 C1D38  | 166.6            | 215.4 | 0.420 | 169.5            | 221.8 | 0.606 |
| B    | 10 C1D37 | 165.2            | 153.3 | 0.443 | 171.3            | 159.8 | 0.589 |
|      | 11 C1A65 | 46.0             | 17.5  | 0.594 | 60.4             | 20.5  | 0.613 |
|      | 12 C1D39 | 156.2            | 167.2 | 0.329 | 162.2            | 179.0 | 0.511 |
| A    | 14 C1A71 | 81.2             | 87.0  | 0.408 | 93.1             | 95.9  | 0.510 |
| **   | 15 COD36 | 149.3            | 28.7  | 0.540 | 180.1            | 32.2  | 0.619 |
| A    | 16 C1A69 | 76.7             | 115.9 | 0.736 | 83.4             | 120.6 | 0.804 |
| C    | 17 COE43 | 146.5            | 119.0 | 0.862 | 165.9            | 127.1 | 0.877 |
| A    | 18 C1A70 | 72.7             | 101.3 | 0.434 | 76.5             | 108.2 | 0.581 |
| **   | 19 C1D40 | 120.7            | 19.3  | 0.577 | 140.8            | 21.8  | 0.670 |
| B    | 20 C1C49 | 130.1            | 88.0  | 0.439 | 137.3            | 93.6  | 0.609 |
| **   | 21 C1D41 | 162.9            | 19.1  | 0.717 | 188.9            | 21.0  | 0.757 |
|      | 22 C1A66 | 47.7             | 33.1  | 0.790 | 53.9             | 35.3  | 0.827 |
| A    | 23 COA52 | 115.0            | 91.7  | 0.182 | 120.0            | 100.7 | 0.481 |
|      | 24 C1A64 | 67.1             | 66.7  | 0.427 | 76.1             | 72.2  | 0.528 |
| B    | 25 C1C51 | 131.1            | 113.1 | 0.389 | 136.3            | 118.1 | 0.587 |
| A    | 26 C1A72 | 81.2             | 118.9 | 0.489 | 89.4             | 134.6 | 0.594 |
| B    | 27 C1C46 | 139.3            | 76.6  | 0.635 | 153.6            | 83.1  | 0.737 |
| C    | 28 C1E44 | 131.6            | 116.3 | 0.828 | 144.7            | 125.2 | 0.855 |
| **   | 29 C1D42 | 139.5            | 45.5  | 0.513 | 160.0            | 49.1  | 0.611 |
| A    | 30 C1A73 | 85.2             | 122.9 | 0.543 | 93.3             | 131.8 | 0.641 |
|      | 31 C1A74 | 54.9             | 94.8  | 0.145 | 57.4             | 98.8  | 0.371 |
| B    | 32 C1C48 | 121.2            | 82.5  | 0.666 | 129.5            | 89.3  | 0.743 |
|      | 33 COA57 | 61.5             | 80.2  | 0.606 | 74.0             | 84.9  | 0.672 |
|      | 34 C1C47 |                  |       |       |                  |       |       |
| A    | 35 C1A68 | 85.9             | 100.5 | 0.677 | 94.1             | 110.0 | 0.753 |
| B    | 36 C1C50 | 138.6            | 206.8 | 0.634 | 146.3            | 214.8 | 0.655 |
| **   | 38 21U11 | 41.0             | 7.4   | 0.510 | 53.8             | 8.6   | 0.597 |
| **   | 39 21D35 | 43.5             | 12.5  | 0.267 | 50.5             | 13.6  | 0.190 |
| B    | 40 21C14 | 97.8             | 86.9  | 0.578 | 110.0            | 92.0  | 0.708 |
| **   | 41 21D17 | 72.3             | 5.5   | 0.523 | 85.5             | 6.5   | 0.641 |
| **   | 42 21C09 | 54.8             | 8.1   | 0.412 | 69.5             | 9.3   | 0.566 |
| **   | 43 21C08 | 66.3             | 21.2  | 0.411 | 89.3             | 24.2  | 0.523 |
| **   | 44 21C07 | 55.8             | 12.8  | 0.442 | 75.5             | 14.7  | 0.528 |
| **   | 45 21D16 | 94.8             | 5.5   | 0.651 | 109.3            | 6.4   | 0.692 |
| **   | 46 21D15 | 58.0             | 10.3  | 0.433 | 81.8             | 11.5  | 0.485 |

R1: 雨量測站之累積雨量(mm)  
R2: 雷達估算之累積雨量(mm)  
CORR: R1和R2之相關性  
\*\*: 測站高度超過500公尺

表 1.1989年5月29日雷達回波估計值及測站雨量值比較表。

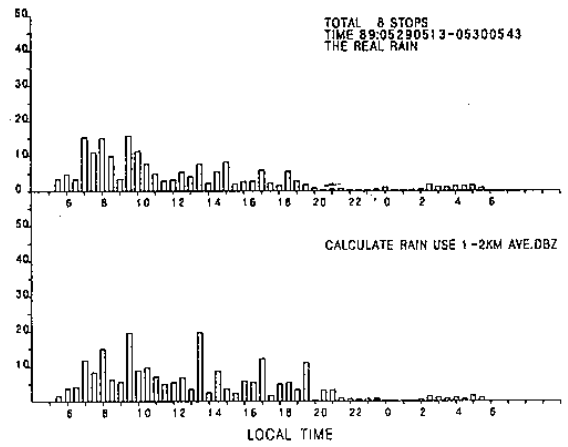


圖 7.1989年P.D.F結果估計雨量值和真實降雨率，A區8個測站的比較圖。上圖為測量平均降雨率，下圖為回波估計降雨率。

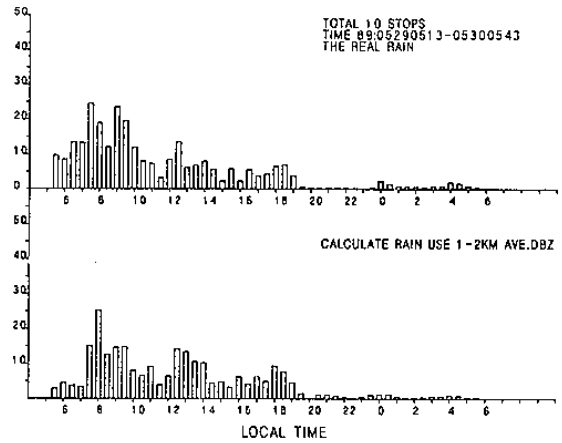


圖 8.1989年P.D.F結果估計雨量值和真實降雨率，B區10個測站的比較圖。上圖為測量平均降雨率，下圖為回波估計降雨率。

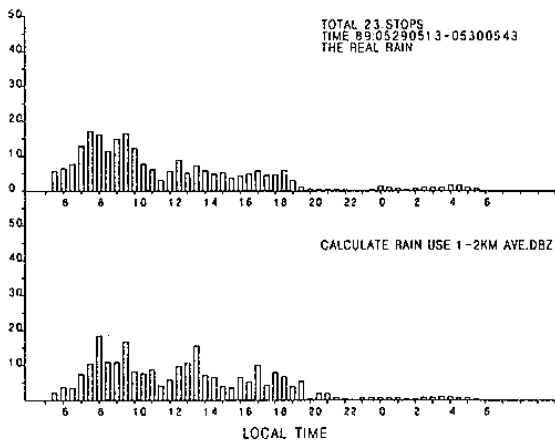


圖 6.1989年P.D.F結果估計雨量值和真實降雨率，23個雨量測站的比較圖。上圖為測量平均降雨率，下圖為回波估計降雨率。

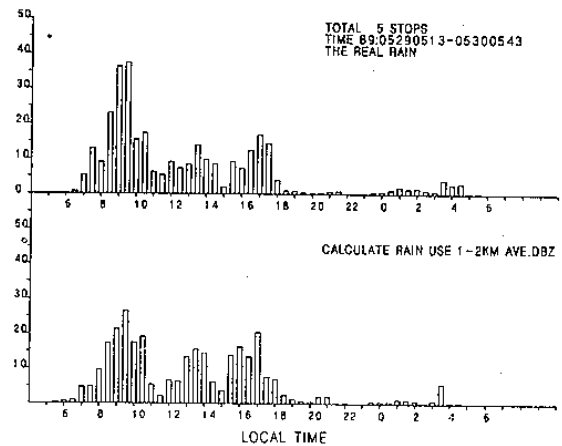


圖 9.1989年P.D.F結果估計雨量值和真實降雨率，C區5個測站的比較圖。上圖為測量平均降雨率，下圖為回波估計降雨率。

| TOTAL : 23 STOPS |         |         |         |         |         |
|------------------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 開始時間 : 5290543   | 5290943 | 5291443 | 5291943 | 5300043 | 5300543 |
| 測站累積雨量 (mm)      | 56.4    | 79.6    | 111.0   | 113.8   | 118.6   |
| 回波估算累積雨量(mm)     | 43.6    | 75.5    | 114.2   | 118.3   | 121.8   |
| 兩者相關性            | 0.868   | 0.658   | 0.690   | 0.813   | 0.846   |

表2.1989年5月29日P.D.F.結果估計雨量之23站平均測試表。

| ( AREA A ) TOTAL : 8 STOPS |         |         |         |         |         |
|----------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 開始時間 : 5290543             | 5290943 | 5291443 | 5291943 | 5300043 | 5300543 |
| 測站累積雨量 (mm)                | 41.4    | 68.7    | 86.5    | 89.0    | 94.2    |
| 回波估算累積雨量(mm)               | 38.8    | 77.0    | 104.8   | 110.1   | 114.4   |
| 兩者相關性                      | 0.900   | 0.761   | 0.692   | 0.734   | 0.802   |

表3.1989年5月29日P.D.F.結果估計雨量之A區平均測試表。

| ( AREA B ) TOTAL : 10 STOPS |         |         |         |         |         |
|-----------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 開始時間 : 5290543              | 5290943 | 5291443 | 5291943 | 5300043 | 5300543 |
| 測站累積雨量 (mm)                 | 75.9    | 115.4   | 136.5   | 139.7   | 144.2   |
| 回波估算累積雨量(mm)                | 51.8    | 89.6    | 121.0   | 124.6   | 127.1   |
| 兩者相關性                       | 0.712   | 0.606   | 0.679   | 0.787   | 0.822   |

表4.1989年5月29日P.D.F.結果估計雨量之B區平均測試表。

| ( AREA C ) TOTAL : 5 STOPS |         |         |         |         |         |
|----------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 開始時間 : 5290543             | 5290943 | 5291443 | 5291943 | 5300043 | 5300543 |
| 測站累積雨量 (mm)                | 62.5    | 113.4   | 147.9   | 150.8   | 159.4   |
| 回波估算累積雨量(mm)               | 43.3    | 96.9    | 140.4   | 144.2   | 150.0   |
| 兩者相關性                      | 0.953   | 0.899   | 0.859   | 0.889   | 0.895   |

表5.1989年5月29日P.D.F.結果估計雨量之C區平均測試表。

經圖6~9及表2~5比較，我們具以下之結論：

1. 所獲得之結果告訴我們，不管選定的區域為何，結果均較其區域內之任一單站為佳，準確性亦大為提高，其相關性均高達0.85左右，其中以C區的结果最佳。(此和其單站原本就具有高相關性有關)
2. 以區域平均後雨量估計值和測站測量值相當接近，結果並沒有單站過度高估及偏低之情形。
3. 發生和單站的一樣情形，仍然以下小雨時段的回波估算誤差較小。
4. 分區的測站雨量平均圖，讓我們明顯的知道，雨帶何時移入此區域，並且有一點值得注意的是，從雨量平均的時間序列圖可隱約發現，雨帶移入陸地後並不是像成熟的對流系統，馬上有最大降水出現，而是發生在降雨後2~3個小時，此情形可能和雨帶移動方向

及地形有密切的關係，當然也有可能雨帶成長初期即移入，然後在原地成長並消散。

#### 4-3. 單一公式及不同降水不同公式之校驗比較

在1989年5月29日個案裡我們最初有針對92個時間(5290013~5302313)，及43個地面測站進行P.D.F.方法分析，同時也得到各層及1~2Km回波平均的Z-R關係式，在此為慎重檢驗當初我們進行時間、測站篩選、是為求更精確的目的。因此本人亦將1~2Km回波平均，得到的Z-R關係式 $Z = 5.77 R^{1.66}$ ，估計29日0513~30日0543這個時段，並且將其各單站結果，及23站、A區八站、B區十站、C區5站、的平均結果做一比較，其結果如(表6,表7~10)。

| CASE 890529 |       | TIME 5290543--5300543 |       |       |          |       |  |
|-------------|-------|-----------------------|-------|-------|----------|-------|--|
|             |       | (對流, 層狀, 分開計算)        |       |       | (單一公式計算) |       |  |
| STOP        | R1    | R2                    | CORR. | R1    | R2       | CORR. |  |
| 1 COA58     | 89.7  | 96.6                  | 0.640 | 89.7  | 98.8     | 0.629 |  |
| C 2 COE42   | 179.4 | 142.5                 | 0.714 | 179.4 | 137.2    | 0.629 |  |
| B 3 C1C52   | 149.4 | 91.1                  | 0.765 | 149.4 | 94.2     | 0.737 |  |
| C 4 C1D43   | 159.9 | 185.4                 | 0.845 | 159.9 | 167.0    | 0.813 |  |
| A 5 CIA67   | 103.7 | 112.9                 | 0.642 | 103.7 | 123.8    | 0.522 |  |
| ** 6 CIA63  |       |                       |       |       |          |       |  |
| B 7 COC45   | 138.6 | 107.5                 | 0.391 | 138.6 | 105.3    | 0.351 |  |
| C 8 C1D44   | 147.2 | 169.8                 | 0.630 | 147.2 | 160.1    | 0.579 |  |
| B 9 C1D38   | 169.5 | 221.8                 | 0.606 | 169.5 | 190.8    | 0.606 |  |
| B 10 C1D37  | 171.3 | 159.8                 | 0.589 | 171.3 | 145.5    | 0.571 |  |
| 11 CIA65    | 60.4  | 20.5                  | 0.613 | 60.4  | 28.5     | 0.511 |  |
| 12 C1D39    | 162.2 | 179.0                 | 0.511 | 162.2 | 168.2    | 0.468 |  |
| A 14 CIA71  | 93.1  | 95.9                  | 0.510 | 93.1  | 103.2    | 0.447 |  |
| ** 15 COD36 | 180.1 | 32.2                  | 0.619 | 180.1 | 40.2     | 0.603 |  |
| A 16 CIA69  | 83.4  | 120.6                 | 0.804 | 83.4  | 113.3    | 0.791 |  |
| C 17 COE43  | 165.9 | 127.1                 | 0.877 | 165.9 | 121.5    | 0.857 |  |
| A 18 CIA70  | 76.5  | 108.2                 | 0.581 | 76.5  | 108.2    | 0.537 |  |
| ** 19 C1D40 | 140.8 | 21.8                  | 0.670 | 140.8 | 29.0     | 0.631 |  |
| B 20 C1C49  | 137.3 | 93.6                  | 0.609 | 137.3 | 95.4     | 0.594 |  |
| ** 21 C1D41 | 188.9 | 21.0                  | 0.757 | 188.9 | 27.1     | 0.754 |  |
| 22 CIA66    | 53.9  | 35.3                  | 0.827 | 53.9  | 39.7     | 0.810 |  |
| A 23 COA52  | 120.0 | 100.7                 | 0.481 | 120.0 | 107.8    | 0.378 |  |
| 24 CIA64    | 76.1  | 72.2                  | 0.528 | 76.1  | 76.3     | 0.502 |  |
| B 25 C1C51  | 136.3 | 118.1                 | 0.587 | 136.3 | 112.9    | 0.569 |  |
| A 26 CIA72  | 89.4  | 134.6                 | 0.594 | 89.4  | 143.6    | 0.432 |  |
| B 27 C1C46  | 153.6 | 83.1                  | 0.737 | 153.6 | 88.3     | 0.703 |  |
| C 28 C1E44  | 144.7 | 125.2                 | 0.855 | 144.7 | 122.2    | 0.835 |  |
| ** 29 C1D42 | 160.0 | 49.1                  | 0.611 | 160.0 | 54.6     | 0.594 |  |
| A 30 CIA73  | 93.3  | 131.8                 | 0.641 | 93.3  | 129.0    | 0.610 |  |
| 31 CIA74    | 57.4  | 98.8                  | 0.371 | 57.4  | 95.7     | 0.366 |  |
| B 32 C1C48  | 129.5 | 89.3                  | 0.743 | 129.5 | 93.7     | 0.695 |  |
| 33 COA57    | 74.0  | 84.9                  | 0.672 | 74.0  | 85.0     | 0.678 |  |
| 34 C1C47    |       |                       |       |       |          |       |  |
| A 35 CIA68  | 94.1  | 110.0                 | 0.753 | 94.1  | 114.6    | 0.657 |  |
| B 36 C1C50  | 146.3 | 214.8                 | 0.655 | 146.3 | 179.4    | 0.671 |  |
| ** 38 21U11 | 53.8  | 8.6                   | 0.597 | 53.8  | 13.5     | 0.581 |  |
| ** 39 21D35 | 50.5  | 13.6                  | 0.190 | 50.5  | 18.3     | 0.125 |  |
| B 40 21C14  | 110.0 | 92.0                  | 0.708 | 110.0 | 92.1     | 0.696 |  |
| ** 41 21D17 | 85.5  | 6.5                   | 0.641 | 85.5  | 10.7     | 0.595 |  |
| ** 42 21C09 | 69.5  | 9.3                   | 0.566 | 69.5  | 14.2     | 0.528 |  |
| ** 43 21C08 | 89.3  | 24.2                  | 0.523 | 89.3  | 32.3     | 0.481 |  |
| ** 44 21C07 | 75.5  | 14.7                  | 0.528 | 75.5  | 20.9     | 0.476 |  |
| ** 45 21D16 | 109.3 | 6.4                   | 0.692 | 109.3 | 10.6     | 0.722 |  |
| ** 46 21D15 | 81.8  | 11.5                  | 0.485 | 81.8  | 16.8     | 0.490 |  |

R1: 雨量測站之累積雨量(mm)  
R2: 雷達估算之累積雨量(mm)  
CORR: R1和R2之相關性  
\*: 測站高度超過500公尺

表6.1989年5月29日不同估計方法結果比較表。

| TOTAL : 23 STOPS |         |         |         |         |         |
|------------------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 開始時間 : 5290543   | 5290943 | 5291443 | 5291943 | 5300043 | 5300543 |
| 測站累積雨量 (mm)      | 56.4    | 79.6    | 111.0   | 113.8   | 118.6   |
| 分開公式累積雨量(mm)     | 43.6    | 75.5    | 114.2   | 118.3   | 121.8   |
| 單一公式累積雨量(mm)     | 35.7    | 71.3    | 96.5    | 108.7   | 119.2   |
| 分開公式之相關性         | 0.868   | 0.658   | 0.690   | 0.813   | 0.846   |
| 單一公式之相關性         | 0.882   | 0.648   | 0.682   | 0.770   | 0.808   |

表7.1989年5月29日不同估計方法之區域測試(23站)。

| ( AREA A ) TOTAL : 8 STOPS |         |         |         |         |         |
|----------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 開始時間 : 5290543             | 5290943 | 5291443 | 5291943 | 5300043 | 5300543 |
| 測站累積雨量 (mm)                | 41.4    | 68.7    | 86.5    | 89.0    | 94.2    |
| 分開公式累積雨量(mm)               | 38.8    | 77.0    | 104.8   | 110.1   | 114.4   |
| 單一公式累積雨量(mm)               | 32.9    | 65.6    | 90.3    | 105.3   | 117.9   |
| 分開公式之相關性                   | 0.900   | 0.761   | 0.692   | 0.734   | 0.802   |
| 單一公式之相關性                   | 0.903   | 0.762   | 0.688   | 0.687   | 0.718   |

表8.1989年5月29日不同估計方法之區域測試(A區)。

| ( AREA B ) TOTAL : 10 STOPS |         |         |         |         |         |
|-----------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 開始時間 : 5290543              | 5290943 | 5291443 | 5291943 | 5300043 | 5300543 |
| 測站累積雨量 (mm)                 | 75.9    | 115.4   | 136.5   | 139.7   | 144.2   |
| 分開公式累積雨量(mm)                | 51.8    | 89.6    | 121.0   | 124.6   | 127.1   |
| 單一公式累積雨量(mm)                | 40.6    | 74.6    | 100.8   | 111.9   | 119.7   |
| 分開公式之相關性                    | 0.712   | 0.606   | 0.679   | 0.787   | 0.822   |
| 單一公式之相關性                    | 0.751   | 0.602   | 0.685   | 0.774   | 0.812   |

表9.1989年5月29日不同估計方法之區域測試(B區)。

| ( AREA C ) TOTAL : 5 STOPS |         |         |         |         |         |
|----------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 開始時間 : 5290543             | 5290943 | 5291443 | 5291943 | 5300043 | 5300543 |
| 測站累積雨量 (mm)                | 62.5    | 113.4   | 147.9   | 150.8   | 159.4   |
| 分開公式累積雨量(mm)               | 43.3    | 96.9    | 140.4   | 144.2   | 150.0   |
| 單一公式累積雨量(mm)               | 34.3    | 78.4    | 114.5   | 125.8   | 141.6   |
| 分開公式之相關性                   | 0.953   | 0.899   | 0.859   | 0.889   | 0.895   |
| 單一公式之相關性                   | 0.976   | 0.887   | 0.849   | 0.866   | 0.843   |

表10.1989年5月29日不同估計方法之區域測試(C區)。

1. 在(表6)各單站的總比較中發現,若是以單一公式求得的雨量值,其累計總雨量和區分降水形態給予不同公式的結果差不多,但相關性則略差。

2. 以區域測試的結果(表7~10)中,我們可以很清楚的發現不管是23站的結果比較,或是A區8站、B區10站、C區5站、的平均結果比較,均顯示:

在下大雨的時段裡,單一公式有低估的情形出現,而較層狀降水的時段則有高估的情形,也就是說以單一公式(不管對流或層狀降水)所獲得的結果較無法掌握豪雨的預報情形。相同的如果降雨形態為一長時間的層狀降水,則以單一公式反求易造成高估的情形。

3. 以雷達回波估計降水,最大的功能即是對對豪雨提出先前預警,但如何將豪雨現象,做一可信度高的預估,唯有區分不同降水時段,求得不同降水形態公式,然後針對不同降水時段給予適當的估算。

## 五、地形對降水之影響

在討論地形雨或地形加強作用的最根本立論就是,當氣流通過山岳地形時,氣流受到強迫抬升,而氣流中潮濕的水汽冷凝造成降水,或是在已存在的降水雨帶裡,地形強迫阻擋,加強其降水強度。此種現象導致在迎風坡上有最大降水出現。

根據國外很多針對此問題所做的雷達觀測研究,發現最大降水並不是發生在山區,而是在山區前的迎風坡上即已發生。

### 5-1. 中正雷達回波水平及垂直剖面圖分析

(圖10-a~f)為本個案,5月29日上午0513-1113,高度2Km的回波剖面圖,配合地形圖(圖1),23個平地測站的雨量平均圖(圖6),進行了解。

1. 由(圖10-a~d)知道在上午0513時雨帶已經移入桃園沿海上空,而且地面測站已有降水記錄,到0613雨帶稍有往東北移動,之後0713、0813的回波圖中,我們可以確定的一件事就是,這段時間引發北部地區降水的雨帶為同一條,而且雨帶是移入陸地之後逐漸成長並加強。此雨帶的形狀呈東北東-西南西走向,和水汽的補充來源(西南氣流)還有北部山區地形走向,幾乎是平行的,而雨帶則是以垂直於臺灣北部山區地形的方向移動,移動速度大約10Km/hr。

2. 由(圖10-d~g)即0813到1113,特別要注意的是:在第一條雨帶後方有另一雨帶形成,其強度較弱但移動速度較快,在0913時兩條雨帶已經合併在一起,此即在此一時段桃園新竹地區有較強降水的原因,1013、1113的回波圖中則可發現雨帶已經在消散中。在這三小時裡雨帶幾乎沒有移動,也就是說雨帶受制於地形強迫阻擋。

3. 在此本人亦從29日0813雨胞垂直回波分佈圖,從事其垂直結構的分析如(圖10-h~j)。

A. 在(圖10-h)我們可以知道雨帶中包含了數個大小不一的對流雨胞,每一個對流雨胞的寬度均在數公里到數十公里間。

B. 而(圖10-i, j)則為垂直雨帶方向的垂直回波場分佈,我們可以清楚的看出地形阻擋雨帶的前進,並強迫雨帶沿地形傾斜,即氣流、雲雨帶有上傾(upslope)情形。當然也可以發現部份的地形雜波並無滲除。

### 5-2. 討論與小結

1. 由測站平均降雨率的時間序列圖(圖6~9),知道最大降雨發生的時間,乃發生在開始降水後的2-3小時,即是雨勢是由小到大,然後逐漸轉弱,之後持續有層狀的小雨情形。經由回波場的水平剖面證明,雨帶確是在發展時即移入陸地,然後逐漸成長而後消散。

2. 其移動方向是由北往南移動,西南方向則補充潮濕的水汽,但其東南有明顯高聳的山岳地形,扮演阻擋的效應,強迫降雨系統在山前成長加強,引發強降水,但同時卻也局限雨帶的移動。

3. 東南山區測站9站的平均降雨率比對非山區23站的降雨率平均圖(圖11),可以發現平地上主降水時段發生在29日5點到11點間,但山區則在10點以後才有較明顯降水記錄,也就是說整個對流降水只發生於山前,但山區雨量記錄在10點以後,持續十幾個小時均超過5mm/hr,但雨勢較平均,不易發現何時具較強烈的對流降水。

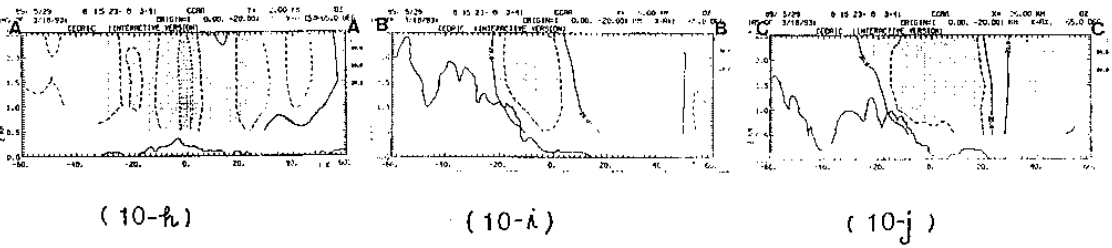
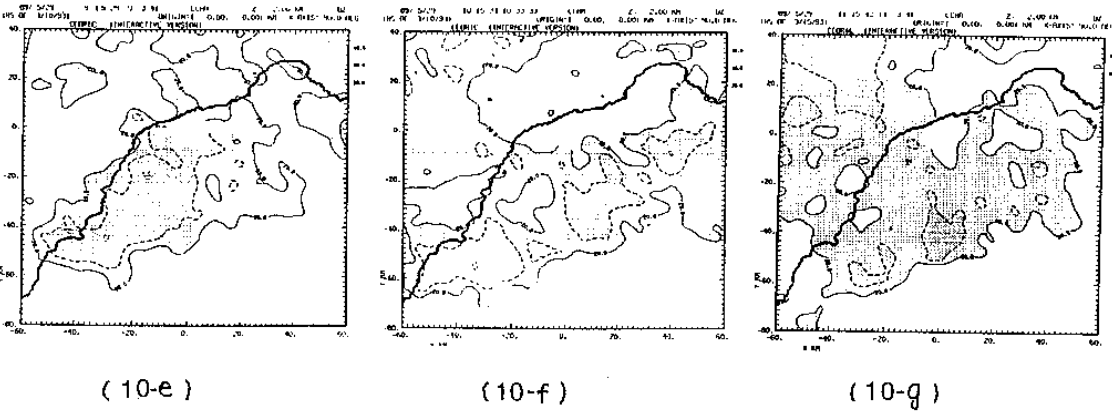
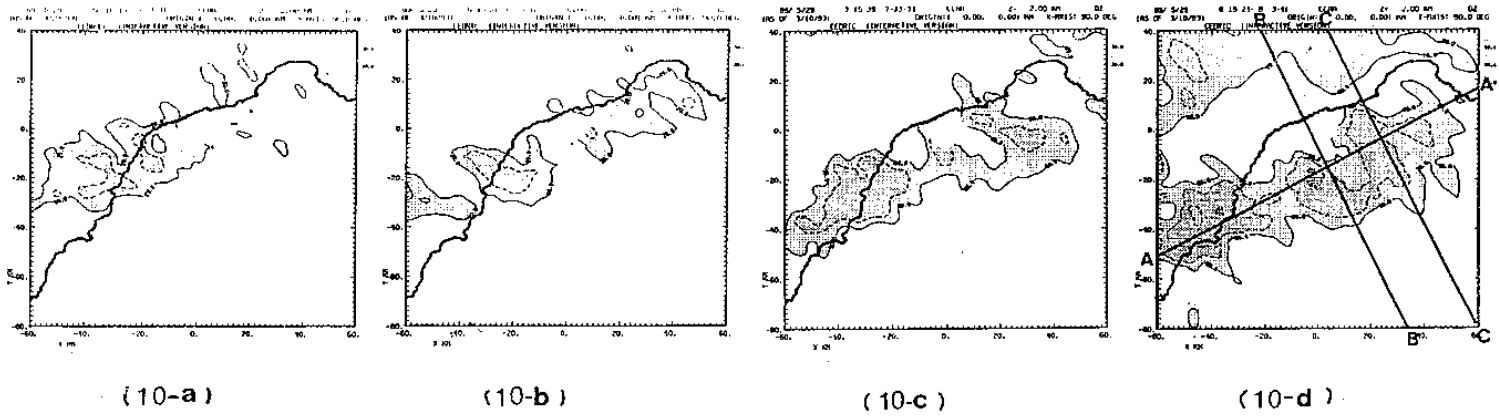


圖 10-a.1989年5月29日0513.高度2.0km的回波水平剖面圖  
 圖 10-b.1989年5月29日0613.高度2.0km的回波水平剖面圖  
 圖 10-c.1989年5月29日0713.高度2.0km的回波水平剖面圖  
 圖 10-d.1989年5月29日0813.高度2.0km的回波水平剖面圖  
 圖 10-e.1989年5月29日0913.高度2.0km的回波水平剖面圖  
 圖 10-f.1989年5月29日1013.高度2.0km的回波水平剖面圖  
 圖 10-g.1989年5月29日1113.高度2.0km的回波水平剖面圖  
 圖 10-h.1989年5月29日0813.高度0~2.5km的垂直剖面圖  
 圖 10-i.1989年5月29日0813.高度0~2.5km的垂直剖面圖  
 圖 10-j.1989年5月29日0813.高度0~2.5km的垂直剖面圖

以上幾個跡象顯示，本個案頗類似 Smith (1979) 中所提的第二點情形，即是雨帶在山前即有對流雨胞形成，而雨帶移動方向幾乎垂直地形，因此導致整個雨帶在山前形成阻擋效應即 (blocking) 現象，此將可以加強整個對流系統的發展，並引發迎風坡上有更大的降水現象。

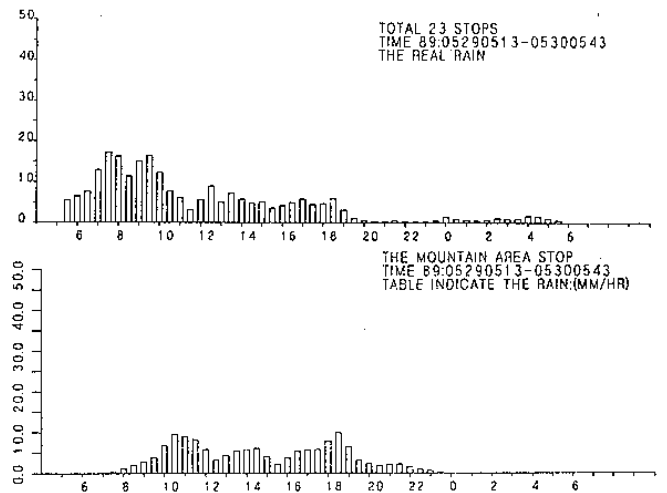


圖 11.1989年5月29日23個平地雨量測量平均降雨率(上圖)，和東南山區測量平均降雨率(下圖)之比較。



## 六、總結與展望

### 6-1. 本文總結

1. 在本文針對Z-R關係式的探討中，以P.D.F.方法所得到的結果頗合理可靠，而且在利用結果代入反求雨量的驗證測試中，發現又以區域平均的結果較佳。
2. 分析個案中，系統移動方向幾乎垂直於北部山區地形，因此地形扮演著阻擋加强的作用。即是因為地形的阻擋，系統的移動速度變慢，因此以每半小時一次的雷達回波取樣其時空的變動性較小，我們得以得到較佳較合理的Z-R關係式。
3. 在我們以P.D.F.方法得到的1989年、1990年關係式及其與國外經驗式的比較圖(圖5)中，我們得到很確定的結果是，我們獲得的斜率即b值非常的合理，但我們得到的截距即a值，卻有一差值。也就是說我們得到的a值和國外經驗式比不管對流降水或層狀降水都有一差值，但我們獲致的結果中層狀降水和對流降水的差異則和國外一致。這一點說明我們應用P.D.F.方法，分析尋求Z-R關係式的過程中合理，並且也可以區分出不同降雨型態的回波特性。
4. 在1989年的個案中我們有針對全部時間、平均降雨率大於5mm/hr、平均降雨率小於5mm/hr三種不同時段，進行P.D.F.方法的分析。在(圖5)中可以清楚的看出全部時段的關係式 $Z = 5.77 R^{1.66}$ ，剛好界於平均降雨率大於5mm/hr的關係式 $Z = 6.93 R^{1.47}$ ，及平均降雨率小於5mm/hr的關係式 $Z = 35.3 R^{1.48}$ 的中間地帶，這種情形在我們以得到的關係式估計雨量，並分區驗證結果的過程中，發現若以全部時段所得的關係式估計時，大雨有低估而小雨有高估的情形，結果較區分估算公式的估計為差。
5. 由於臺灣山岳地形複雜，使中正雷達在做低層掃描時，會因為地形阻礙部份波束之能量，而造成回波有明顯降低的情形。此外即使波束主瓣完全被山脈阻擋，雷達天線仍可以收到副瓣的訊息，因此我們可由回波剖面圖發現山區仍有回波。這些原因將造成垂直方向內差後，低層存在有異常的弱回波。加以本文中各測站的回波值皆以“測試面積”內16點的回波平均值代表，因此回波值也會因平均後而降低。
6. 以臺灣北部的山岳地形走向而言，若是雨帶系統以垂直方向移入，勢必造成強迫抬升作用，如果水汽補充旺盛，更可能引發豪雨。

### 6-2. 未來展望

使用雷達回波估計降水，是一門相當複雜困難的問題，除了必須具備雷達氣象的知識外，亦必須針對所分析的降水系統有非常深入的了解，因不同天氣、不同降水型態其運動場結構，雲物理過程，及雨滴譜分佈，均在在的影響到整個降水過程。

由於目前國內尚未有雨滴譜分析儀器，因此無完整的雨低譜資料，但由於雨低譜資料和降水估算息息相關，如果能夠及早建立雨低譜資料，則勢必大大的提高回波估算降水的準確性。

在進行回波估計降水的研究過程中，為避免過大的誤差，及增加正確性，回波場的高度不宜選擇過高，但中正雷達低仰角(即低層回波)，所得到的資料有偏低的情形，這將導致我們在做Z-R關係式尋找時有很大的困難，如應用於預報上亦有其限制(回波變化區很窄)。

如果可以尋找出低層回波不正常降低的修正方法，並針對低仰角增加觀測，則將可以將回波在低層垂直變動所引發的降水估計誤差降至最低，則中正雷達的功能及解析度必可大大提高。

在本文中平均降雨率的求得，係以回波前後10分

鐘平均取得，此或有其爭議的地方，因此今後在進行P.D.F.方法分析尋找Z-R關係式時，平均降雨率的求取，應加強不同時間的平均測試。

目前現階段在Z-R關係式尚未明確建立之前，個人認為仍適合以P.D.F.方法，大量的統計不同型態的降水個案，找出最合適的降水估算公式，並和作業單位實際校驗，以提高雷達預報的功能。當然此一方法也須應用到臺灣各個雷達站的Z-R關係建立，以P.D.F.方法測試出每一個雷達的預報特性，那麼將可經由整個雷達觀測網，對影響到臺灣地區的天氣系統，及早提出警告和預防。

## 七、參考文獻：

- 陳台琦，林沛練，1991：梅雨季節北部降雨系統雨量估計。行政院防災科技研究報告80-25號，計畫編號：NSC 80-0414-P008-01B。
- 陳台琦，林沛練，1992：梅雨季節北部降雨系統雨量估計(二)。行政院防災科技研究報告81-25號，計畫編號：NSC 81-0414-P008-02B。
- 祝鴻鵬，曾憲媛，李正雄，1991：利用都卜勒雷達對臺灣北部局部大雨降雨量之研究。中央氣象局科技研究中心技術報告彙編，第5-1卷，1-20頁。
- 陳台琦，鄭邦傑，徐岳五等，1988：數據化雷達降雨量之初步探討。中央氣象局科技研究中心彙編，第2-2卷，77-86頁。
- 陳文恭，許浩淳，1992：雷達回波資料應用於颱風結構分析之研究。天氣分析與預報研討會論文集編，521-530頁。
- 蘇良石，楊明錚，陳來發，陳文恭，1992：雷達輔助之降水強度估計。天氣分析與預報研討會論文集編，281-288頁。
- 鄧財文，陳景森，陳台琦，1992：1990年六月九日北部地區豪雨個案的綜觀環境及降水分析。大氣科學，20-2，97-117。
- 張淑玲，1992：梅雨鋒面的雨帶結構。中央大學大氣物理研究所碩士論文。
- Battan, L.J., 1973：Radar observation of the atmosphere. University of Chicago press, 323pp.
- Brandes, E., 1974：Radar rainfall pattern optimizing technique. NOAA Te Memo. ERL NSSL-67, Norman, Oklahoma, 16pp.
- , 1982：Rainfall Measurement with radar, proceedings of the NEXRAD Doppler Radar Symposium/Workshop Sponsored by the CIMMS, Univ. Oklahoma-NOAA, Sept. 22-24, 144-163.
- Marshall, J.S., W. McK. Palmer, 1948：The distribution of raindrops with size. J. Meteor., 5, 165-166.
- Short, D.A., T. Kozu, and K. Nakamura, 1990：Rainrate and raindrop size distribution observations in Darwin Australia. URSI Commission F Open Symposium on Regional Factors in Predicting Radiowave Attenuation Due to Rain Rio de Janeiro, Dec, 3-7.

Smith,R.B., 1979 : The influence of mountains on the Atmosphere . *Advances in Geophys.*, 21, 37-217.

Wilson,J.W., 1970 : Integration of radar and raingauge data for imporved rainfall measurement. *J. Appl. Meteor.*, 9, 489-497.