

# 利用最大協變異數與群集分析法探討侵台颱風測站風雨觀測特徵

蔡孝忠<sup>1</sup> 李天浩<sup>2</sup>

- 1.國立台灣大學土木工程研究所博士候選人
- 2.國立台灣大學土木工程學系副教授暨水工試驗所副研究員

## 摘要

本研究使用最大協變異數分析法(Maximum Covariance Analysis, MCA)探討颱風風雨對應特徵。MCA將兩偶合變數場分別進行主軸旋轉，以最大化兩變數投影量的交叉協變異數平方(squared cross-covariance)的方式，求取重要的特徵向量。資料採用1987-2004年17個氣象站之風速風向、雨量觀測資料，以及4個位於雪山山脈的雨量站觀測，共約5000小時的颱風個案。藉由MCA的奇異向量(singular vectors)與群集分析邏輯，進行風場型態分類。分析結果顯示，前三個風雨主要特徵分量約由53%的颱風案例小時數所組成，分別可解釋70%、20.6%和7.6%的交叉協變異數平方，共98.2%；風雨分量的相關係數分別為0.59、0.48和0.49。三種主要的風向依序分別為：接近垂直於雪山山脈的西北風；吹向中央山脈與雪山山脈南側的西南風；近似垂直於中央山脈和雪山山脈北端的東風。三種對應的降雨特徵模組皆呈現極化型態，代表雨量大的正相位與迎風面區域吻合，雨量小的負相位則出現在背風面。分析氣壓、相對溼度和氣溫觀測差異場和三種風雨主要特徵分量的關聯性顯示，迎風面的氣壓和相對溼度增高、氣溫降低；背風面則有氣壓和相對溼度降低、氣溫增高的現象。

關鍵詞：颱風、降雨、風場、最大協變異數分析法、群集分析法、主成份

## 一、前言

侵台颱風受到中央山脈地形阻擋的影響，地形對颱風環流具有鎖定效應，因此中心位置類似之颱風個案，所伴隨之風場和降雨分佈往往也相近(Wu and Kuo 1999)。因此颱風氣候降雨推估方法的研究，多採用颱風中心位置和颱風中心最大風速做為降雨量的主要估計因子(predictor)，例如王時鼎(1983)將台灣測站降雨量依照颱風中心位置以經緯度網格分類，分析颱風降雨並開發颱風氣候降雨估計模式。張志琳(1998)、蔡孝忠(2000)以雙傅利葉迴歸函數建立淡水河流域颱風氣候降雨估計模式，並以克利金法(Kriging Method)由所有測站的降雨量估計值，內插推估各子集水區的面積平均降雨和總雨量。上述方法的隱含假設是颱風中心類似時，風場型態也會相似，乃可平均推估降雨趨勢。

Chang et al.(1993)分析颱風中心在17°N-27°N、117°E-127°E範圍內的颱風個案，以2°×2°的網格將颱風個案分類，討論全台地面測站氣壓觀測和降雨量型態因為颱風中心位置不同所造成的平均差異；其次利用主成份分析(Principal Component Analysis, PCA)探討颱風中心落在17°N-27°N、117°E-127°E範圍內時，全台地面測站的氣壓變化，再以線性迴歸連結氣壓主成份(mode)和其氣象因子的關係。Yeh(2002)以PCA探討颱風中心在18°N-28°N、116°E-126°E範圍內之全台6小時

累計降雨量，分析颱風降雨的主要特徵，並且採用前三個降雨量主成份再搭配其他相關因子(如中心位置經緯度座標、移動速度、行進方向、Julian Day...等)，嘗試建立2°×2°網格內各單一測站降雨量累計值之線性迴歸關係。

蔡孝忠(2000)的颱風案例分析顯示，即使颱風中心位置相似，台灣地區的風場與流型未必相同；中心位置不同的颱風個案，也有可能在台灣地區產生相似的風場型態。若採用颱風中心位置做為測站颱風降雨的主要影響因子，將無法正確表現不同颱風個案的風雨特徵差異。Lin et al.(2002)的研究顯示，山區降雨主要是由地形強迫氣流舉升效應所主導，只要氣流狀況有助於產生地形雨，往往在颱風登陸之前，甚至颱風距離台灣仍遠時，山區就會發生強降雨，因此颱風中心位置相對於台灣的距離並不一定是引發強降雨的必要條件。謝信良等人(1997)歸納出受到中央山脈影響之颱風環流流型，且不同流型所對應的降雨型態有明顯差異；例如「非阻擋流型」在山區迎風面有上坡流，降雨量偏多；「阻擋流型」在迎風面氣流為繞山，山前為停滯區無爬山效應，山脈兩側雨量較小；「沿山流型」之氣流多為沿山而行，因此各地區之降雨量偏小或無雨。

由以上研究可知，地形對於風雨之鎖定關係與颱風中心位置無確定的關聯性，其決定條件乃是當時氣流狀況可否符合地形降雨的引發機制，因此應

直接以測站的風雨觀測值探討兩者之對應關係，且需採用可分析偶合場(coupled fields)的理論方法。

PCA可探討單一變數場(single field)的變異量，無法多變量分析兩個變數的偶合場(coupled fields)。最大協變異數分析法(Maximum Covariance Analysis)又稱奇值分解分析法(Singular Value Decomposition Analysis)，可直接分析兩個變數的偶合場(coupled fields)。利用線性組合式將偶合場轉換為兩組純量資料，然後分析兩組純量資料之交叉協變異量(cross-covariance)，尋求可解釋較多變異數、且具有高相關性的偶合場空間對應特徵的模組(Prohaska 1976, Wallace et al. 1992)。

PCA和MCA通常是應用在純量場(scalar field)的分析。在向量場的研究方面，Webber et al.(1997)將三維流場之流速分解成u、v、w三個分量，同時進行PCA(若有  $n \times n$  個網格點，協變異數矩陣之維度則為  $3n \times 3n$ )，再將三倍長度特徵向量(eigen vectors)之中，位於相同位置的u、v、w分量，重新組合為三維向量(將其稱之為real-vector PCA, RVPCA)。Kaihatu et al.(1998)使用CPCA和RVPCA分析海洋表面洋流，研究結果指出，RVPCA 的分析對於潮汐的辨識表現較佳，認為該方法可以應用至三維向量場。

本研究擬採用RVPCA對向量觀測的處理方式，將全台17個測站的水平風向量分解為34個純量變數；以MCA法分析歷史颱風期間全台17個測站風向量和21個測站的雨量觀測紀錄資料，找出風雨對應特徵。內容包括MCA和群集分析理論方法簡介、採用的颱風和地面觀測資料，並討論分析結果所顯示的意義。

## 二、研究方法

### 2.1 最大協變異數分析法(Maximum Covariance Analysis, MCA)

最大協變異數分析法，或稱為奇值分解分析法，是用來分析兩個變數偶合場，找尋各自的旋轉主軸，使得原始變數場經過主軸旋轉後，兩主軸投影量的交叉協變異數(cross-covariance)為最大的方法(Prohaska 1976, Wallace et al. 1992, Bretherton et al. 1992)。

假設兩組原始純量變數場包括  $X_i(t)$  和  $Y_j(t)$ ， $i=1 \sim m$ ， $j=1 \sim n$ ， $t=1 \sim T$ ；兩原始變數場經過主軸旋轉後，在主軸上投影量是以線性組合式表示：

$$Z_x^k(t) = (\mathbf{a}^k)^T \cdot \mathbf{X} = \sum_{i=1}^m \mathbf{a}_i^k \cdot X_i(t) \quad (1)$$

$$Z_y^k(t) = (\mathbf{b}^k)^T \cdot \mathbf{Y} = \sum_{j=1}^n \mathbf{b}_j^k \cdot Y_j(t) \quad (2)$$

其中， $E[X_i(t)] = E[Y_j(t)] = 0$ ， $\forall i, \forall j$ ； $\mathbf{a}^k$ 、 $\mathbf{b}^k$  為權重係數單位向量  $|\mathbf{a}^k| = |\mathbf{b}^k| = 1$ ； $k$  代表MCA由大到小的分量排序( $k^{\text{th}}$  mode)。MCA的主軸投影量具有正交特性，若  $i \neq j$  則  $\text{cov}(Z_x^i, Z_y^j) = 0$ 。

經過推導後可證明  $\mathbf{a}^k$ 、 $\mathbf{b}^k$  為  $\mathbf{C}_{xy}$  的奇異向量(singular vector)，而  $\mathbf{C}_{xy}$  矩陣的奇異值( $\lambda$ )具有以下特性：

$$\lambda_1^2 = \text{cov}^2(Z_x^1, Z_y^1) > \lambda_2^2 = \text{cov}^2(Z_x^2, Z_y^2) > \dots > \lambda_p^2 = \text{cov}^2(Z_x^p, Z_y^p) \quad (3)$$

其中， $p = \text{Rank}(\mathbf{C}_{xy}) = \min.(m, n)$ 。每個MCA分量所解釋的交叉協變異數平方百分比(Squared Covariance Fraction, SCF)定義為：

$$\text{SCF}_k = \frac{\lambda_k^2}{\sum_{i=1}^p \lambda_i^2} \times 100\% \quad (4)$$

交叉協變異數平方累積百分比(Cumulative Squared Covariance Fraction, CSCF)為：

$$\text{CSCF}_k = \frac{\sum_{j=1}^k \lambda_j^2}{\sum_{i=1}^p \lambda_i^2} \times 100\% \quad (5)$$

### 2.2 颱風風場群集分析

風雨MCA分析所求得的主要分量，即為重要的風雨關聯特徵，因此本研究將藉由MCA分析結果將原始資料分類。風雨MCA之奇異向量皆為單位向量，若要以MCA的風場奇異向量做為分類基準，則必須先將原始風場觀測資料 ( $\mathbf{W}_t = [(u_{1t}, v_{1t}), \dots, (u_{Nt}, v_{Nt})]$ ， $N$ :測站數) 進行以下前處理：

(i) 去除各測站風場觀測之平均值：

$$\mathbf{W}_t' = [(u_{1t}', v_{1t}'), \dots, (u_{Nt}', v_{Nt}')] \quad (6)$$

其中， $u_{it}' = u_{it} - \bar{u}_i$  和  $v_{it}' = v_{it} - \bar{v}_i$ ； $\bar{u}_i$  和  $\bar{v}_i$  為各測站  $u_i$  和  $v_i$  的平均值， $i=1 \sim N$  (測站數)。

(ii) 將  $\mathbf{W}_t'$  除以  $\mathbf{W}_t'$  之向量長度以轉換為單位向量：

$$\mathbf{W}_t'' = \frac{\mathbf{W}_t'}{\|\mathbf{W}_t'\|} = [(u_{1t}'', v_{1t}''), \dots, (u_{Nt}'', v_{Nt}'')] \quad (7)$$

其中， $\|\mathbf{W}_t'\|$  為  $\mathbf{W}_t'$  的向量長度(norm)。

經過上述前處理後，標準化觀測值  $\mathbf{W}_t''$  和MCA mode  $k$  風場奇異向量( $\mathbf{a}^k$ )的相似性，則是以兩者之間的距離為代表。本研究參考Kaufmann (1999)所定義的相似性計算方式，並將方程式內的變數更換改寫如下：

$$d_{i,k} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N [(u_{n,t}'' - a_{2(n-1)+1,k})^2 + (v_{n,t}'' - a_{2(n-1)+2,k})^2]^{\frac{1}{2}} \quad (8)$$

假設有  $P$  種主要風場型態，本研究提出的風雨MCA監督式群集分析是尋找  $d_{i,r} \sim d_{i,p}$  的最小距離值，任一小時的風場觀測值( $\mathbf{W}_t$ )群集分類準則為：

$$\text{Type of } W_i = \begin{cases} k & ; d_{i,k} \text{ is min. and} \\ & d_{i,k} \leq d_{k,\text{threshold}} \\ P+1 & ; \text{otherwise} \end{cases} \dots (9)$$

其中， $d_{k,\text{threshold}}$ 為距離門檻值。(9)式表示，若 $d_{i,k}$ 為 $d_{i,1} \sim d_{i,p}$ 的距離最小值，而且 $d_{i,k}$ 小於等於距離門檻值( $d_{k,\text{threshold}}$ )，則將 $W_i$ 定義為Type  $k$ ；如果 $d_{i,1} \sim d_{i,p}$ 皆大於對應的距離門檻值，則 $W_i$ 不屬於任何既定型態，並將其定義為Type ( $P+1$ )。此外，由於風場資料經過(6)和(7)式的標準化處理，故 $d_{i,k}$ 是一種標準化之後的距離，將使得分類結果僅重視整體型態是否相似，而不會受到尺度變化的影響(scale invariant)。

### 三、使用資料

#### 3.1 地面氣象觀測與颱風路徑資料

Chang et al.(1993)與Yeh(2002)所使用之氣象觀測站主要是分佈於台灣沿海，以及位於中南部山區的日月潭站與阿里山站，分析結果缺乏雪山山脈的資訊。本研究一共選用了17個具有每小時風速、風向、雨量、溫度與相對溼度觀測之中央氣象局氣象測站，以及4個自動雨量站的時雨量觀測資料。為了反映北部山區降雨，採用火燒寮、桶後、鳥嘴山、白蘭站等4個位於雪山山脈的雨量觀測資料，藉由雪山山脈測站數量增加的配置方式，突顯此區域降雨變異量的比重，使得風雨MCA的分析結果可反映北部山區降雨特徵。此外，本研究同時使用測站風速、風向觀測資料，並非僅使用風速純量資料，更有助於分析風場特徵與轉變。參考Webber et al. (1997)應用real-vector PCA的過程，將各測站之小時風場觀測分解為u、v兩分量，因此風雨MCA之左變數場(left field)為34個風場純量數據的組合，右變數場(right field)則為21個雨量觀測站的時雨量資料。測站之基本資料與分佈圖請參考表1與圖1。

本研究藉由風場與地形雨的鎖定效應，以及MCA分析法的特性，直接分析颱風風雨相關性，不將風雨觀測資料先依照颱風中心位置以經緯度網格分類，而是在風-雨MCA分析完畢後，再分析各分量與颱風中心位置的關係。颱風路徑資料採用美國聯合颱風警報中心(JTWC)所提供之1987-2004年的每6小時最佳路徑資料，分析範圍為 $117^\circ\text{--}127^\circ\text{E}$ 、 $19^\circ\text{--}28^\circ\text{N}$ 。在最佳路徑資料經過線性內插取得每小時之中心位置，並且比對所有挑選測站之氣象觀測資料之後，一共約有5000小時的相關資料可供後續分析。

### 四、分析結果與討論

#### 4.1 風場-降雨量 MCA 特徵

前三個MCA主要分量已可以解釋98.2%的交叉協變異數平方，SCF分別為70%、20.6%、7.6%，相關係數分別為0.59、0.48、0.49，而剩餘的MCA modes僅有1.8%的解釋能力，且相關性較低，因此僅挑選前三項進行後續分析。

將MCA分量的無因次奇異向量(singular vectors)，依照各測站地理位置繪製平面圖，即可分析MCA主要分量之空間特徵。圖2(a)-(c)分別為MCA Mode 1至Mode 3的風場型態，而圖2(d)-(f)則是Mode 1至Mode 3之降雨空間特徵。

Mode 1風場的主要特徵顯示(圖2(a))，迎風面多為與山脈走勢近似垂直之風向，而背風面因位處於尾流區(wake zone)，因此風速較弱。而Mode 1風場型態所對應之降雨特徵(如圖2(d))則是以雪山山脈、北部之陽明山、以及中南部之阿里山山區為最顯著；降雨量在南部測站或位於背風面的東部/東南部測站則顯示了與西部測站呈反相(out-of-phase)的特徵，顯示背風面之降雨量較低。

風-雨MCA的第二個分量之風向為西南風，使得台灣西南部和雪山山脈南端的區域容易有上坡流的現象產生，因此所對應之降雨量是以西部之阿里山站為中心，並往北延伸至雪山山脈之南端；東北部與東部之風向主要為沿山氣流，氣流無地形舉升效應，因此降雨量與西部/西南部迎風面之降雨呈反相，降雨量偏低(請見圖2(b)與圖2(e))。風-雨MCA的第三個主要分量(請見圖2(c)與圖2(f))主要在台灣東北部/東部有正對地形的東風，因此降雨發生地點是以東部/東北部為主，並且與雪山山脈南端的降雨特徵呈反相。

#### 4.2 颱風風場群集分析

為了使得分類過後的風雨分量具有較高的相關性，且資料重疊的情形不明顯，本研究選取的距離門檻值為：

$$d_{1,\text{threshold}} = d_{2,\text{threshold}} = d_{3,\text{threshold}} = 0.24 \quad (10)$$

依照上述步驟分類完成之後，三種主要風場型態的資料數量約佔所有資料的53%，分別為25%、9%和19%。由MCA風雨分量的相關性分析可知，風雨分量相關性在分類過後皆有提高；Type 1由0.59提升為0.69，Type 2和Type 3分別由原本的0.48、0.49，提升為0.66和0.58。

將風場群集分類的結果，依照颱風中心位置繪製空間分佈圖，結果如圖3。由圖可知，颱風中心類似之颱風個案，風場型態並不一定會相同，中心位置類似的區域可能會有多種類型的風場型態。屬於Type 1的個案多位於台灣東方/東北方，平均中心位置約位於 $(124.3^\circ\text{E}, 24.5^\circ\text{N})$ ；Type 2個案多位於台灣西北方，平均中心位置約位於 $(120.5^\circ\text{E}, 25.1^\circ\text{N})$ ；Type 3個案多位於北緯24度以南的區域，平均中心位置約位於 $(121.3^\circ\text{E}, 21.5^\circ\text{N})$ 。本研究將以此分類結果進行後續詳細分析。

#### 4.3 氣象因子差異

藉由風場分類結果，求取三種類型風場所對應的各測站氣溫、相對溼度和氣壓觀測平均，然後再減去該氣象因子於各測站所有資料的平均值，以求取距平場(anomaly field)。分析結果顯示(figures not shown)，迎風面的溫度多為負值，即表示迎風面溫

度低於平均值，而背風面則有溫度升高的現象。相對溼度距平場的分析結果則與溫度距平場的分析結果相反；迎風面的相對溼度高於平均值，而背風面的測站相對溼度則有降低的現象。同理，由氣壓距平場的分析也可發現迎風面與背風面的氣壓對比差異；其中Type 1的氣壓差異型態大致是與Chang et al.(1993)的mode 3對應，Type 2的氣壓型態則是與Chang et al.(1993)的mode 2對應。

以上現象主要可歸納為颱風侵台時期台灣中央山脈群之地形對於各氣象變因之影響。其中，由於中央山脈之長軸主要為南北向，且長短軸比例差異頗大，因此地形對於Type 2之西南風的阻擋效應並不如Type 1和Type 3顯著，故氣溫、相對溼度、氣壓的差異也較小。而王時鼎(1992)在颱風個案中尺度分析的報告中亦發現，背風面因下沉氣流乾熱，常有焚風的現象產生，造成氣溫顯著上升、相對溼度下降，對於農作物造成重大損害。

## 五、總結

本研究使用最大協變異數分析法和群集分析法，探討颱風侵台時期的測站風雨觀測對應特徵。研究結果顯示，MCA得到的颱風風雨主要分量，都是突顯颱風某個風向與台灣某塊地形產生最大迎風面降雨的型態。由於降雨量的變異係數 (coefficient of variation) 大於風的變異係數，所以降雨變異量的重要性，大於風速與風向的變異量。風雨主要分量資料所對應的氣壓、溫度和濕度資料的分析，亦支持迎風面與背風面具有差異的觀點。本研究提出的颱風風雨對應關係的分析和分類過程，可有效從大量的歷史資料之中，抽離出主要的颱風風雨對應特徵。對於颱風侵台時期的地面測站風雨聯性，提供了詳細的定量分析結果，且特徵場皆為空間資訊，不僅是單一測站的單點資訊，研究人員可藉此進行較為全面性的物理機制解釋與探討。

## 誌謝

感謝中央氣象局王時鼎顧問，以及台灣大學大氣科學系吳明進教授提供寶貴建議，以及大氣研究資料庫提供本研究所須之觀測資料。

## 參考文獻

1. 王時鼎, 1983: “臺灣颱風降雨特性及其預報研究(一)”, 行政院國家科學委員會防災科技研究報告 72-13 號。
2. 王時鼎, 1992 “侵台颱風路徑、強度、結構及風雨整合研究”。國科會防災科技研究報告, 80-73 號, 1-285。
3. 張志琳, 1998: “淡水河流域颱風面積定量降雨氣候模式預報之研究”, 台灣大學土木工程研究所碩士論文。
4. 謝信良、王時鼎、鄭明典、葉天降, 1997: “台灣地區颱風預報輔助系統建立之研究, 第二階

段, 侵台颱風路徑、強度、風力預報之應用研究(二)”, 中央氣象局氣象科技中心。

5. 蔡孝忠, 2000: “淡水河颱風定量降雨氣候模式預報改進之研究”, 台灣大學土木工程研究所碩士論文。
6. Bretherton, C.S., Smith, C. and Wallace, J.M., 1992: “An Intercomparison of Methods for Finding Coupled Patterns in Climate Data”, *Journal of Climate*, 5(6): 541-560.
7. Chang, C.-P., Yeh, T.-C. and Chen, J.M., 1993: “Effects of Terrain on the Surface Structure of Typhoons over Taiwan”, *Monthly Weather Review*, Vol. 121, No. 3, pp. 734-752.
8. Kaihatu, J.M., Handler, R.A., Marmorino, G.O. and Shay, L.K., 1998: “Empirical orthogonal function analysis of ocean surface currents using complex and real-vector methods”, *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 15(4): 927-941.
9. Lin, Y.L., Ensley, D.B., Chiao, S. and Huang, C.Y., 2002: “Orographic influences on rainfall and track deflection associated with the passage of a tropical cyclone”, *Monthly Weather Review*, 130(12): 2929-2950
10. Prohaska, J.T., 1976: “Technique for Analyzing Linear Relationships between 2 Meteorological Fields”, *Monthly Weather Review*, 104(11): 1345-1353.
11. Wallace, J.M., Smith, C. and Bretherton, C.S., 1992: “Singular Value Decomposition of Wintertime Sea-Surface Temperature and 500-Mb Height Anomalies”, *Journal of Climate*, 5(6): 561-576.
12. Webber, G.A., Handler, R.A. and Sirovich, L., 1997: “The Karhunen-Loeve decomposition of minimal channel flow”, *Physics of Fluids*, 9(8): 2461-2461.
13. Wu, C.C. and Kuo, Y.H., 1999: “Typhoons affecting Taiwan: Current understanding and future challenges”, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 80(1): 67-80.
14. Yeh, T.C., 2002: “Typhoon rainfall over Taiwan area. The empirical orthogonal function modes and their applications on the rainfall forecasting”, *TAO* 13, 449 - 468.

表 1.本研究使用之中央氣象局測站

代碼	測站名稱	屬性
M1	火燒寮	雨量站
M2	桶後	雨量站
M3	烏嘴山	雨量站
M4	白蘭	雨量站
N1	台北	氣象站
N2	竹子湖	氣象站
N3	基隆	氣象站
N4	新竹	氣象站
W1	梧棲	氣象站
W2	台中	氣象站
W3	日月潭	氣象站
S1	嘉義	氣象站
S2	阿里山	氣象站
S3	台南	氣象站
S4	高雄	氣象站
S5	恆春	氣象站
E1	宜蘭	氣象站
E2	花蓮	氣象站
E3	台東	氣象站
E4	成功	氣象站
E5	大武	氣象站

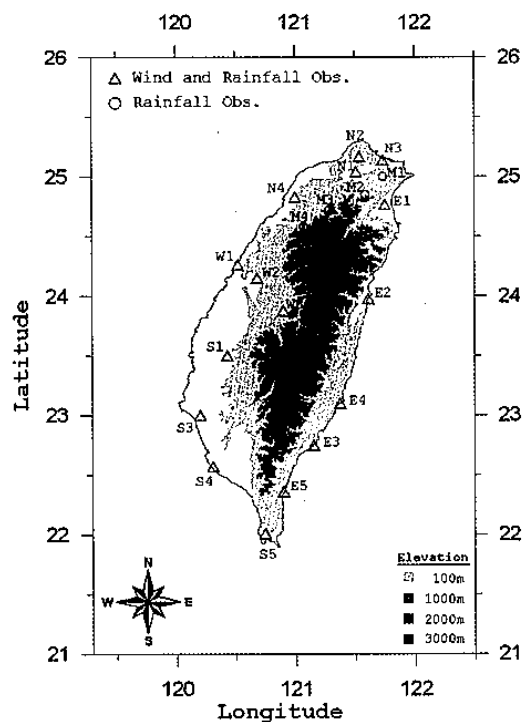


圖 1.本研究採用之中央氣象局氣象及雨量觀測站分佈圖。

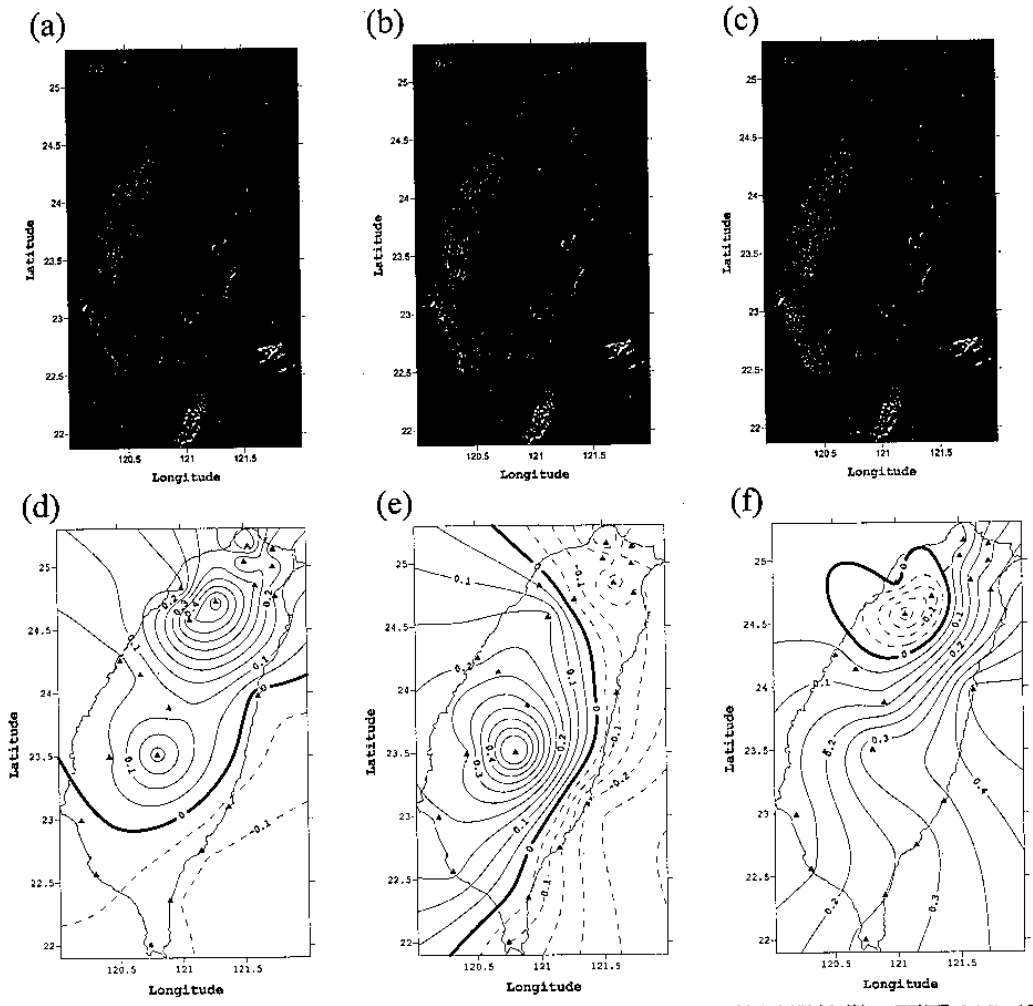


圖 2.風場-降雨之 MCA 分析結果。圖 2(a)-(c)為 MCA Mode 1 至 3 的風場特徵，而圖 2(d)-(f)則是 MCA Mode 1 至 3 之降雨空間分佈，單位皆為無因次。

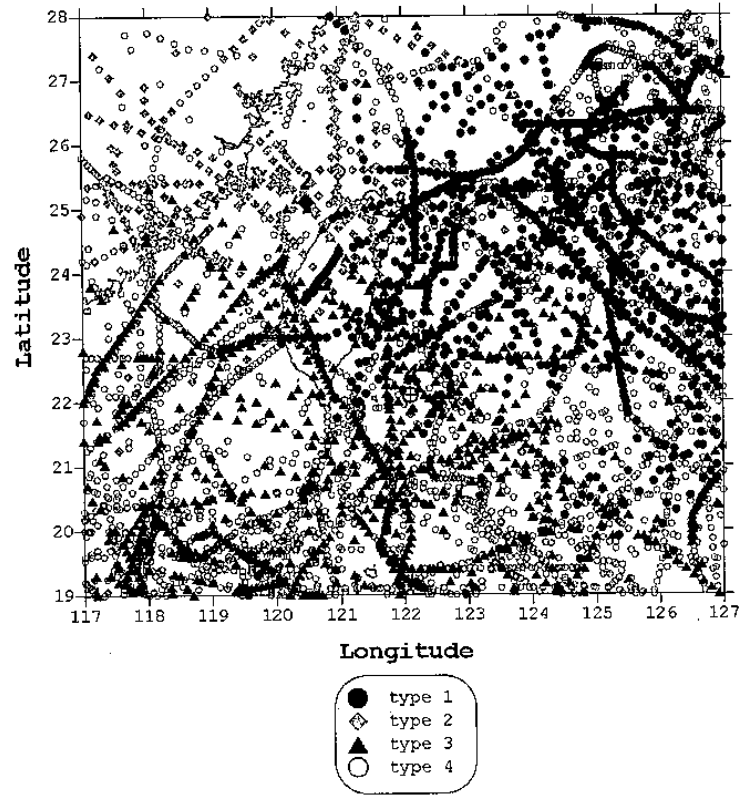


圖 3.颱風風場群集分類結果。各類型之平均中心座標亦標示於圖中。