

侵台颱風伴隨降雨分析與高解析度降雨預報模式之建立

李清勝
國立台灣大學
大氣科學研究所

沈鴻禧
防災科技計畫辦公室
氣象研究群

摘要

颱風所導致的降雨與颱風中心的距離有相當密切的關係；一般而言，距離颱風中心越近，雨量越大，且降雨多集中於颱風半徑300公里以內的地方；台灣地形對颱風降雨確有顯著的影響，在高度700公尺、1,300公尺、2,000公尺及3,800公尺左右有極大值的雨量出現。

此外，針對鹽水溪、高屏溪、大甲溪、烏溪、濁水溪、淡水河及蘭陽溪七個流域，共計完成161個雨量站氣候統計定量降雨預報圖，資料時段為1989-1998年，研究範圍 $19-27^{\circ}\text{N}$, $118-126^{\circ}\text{E}$ ；並利用Barnes客觀分析方法修正改進結果，將降雨氣候統計預報圖解析度由原來 0.5° 提升至 0.1° 緯度/經度。

為校驗模式預報正確率，本研究所採用的方法是計算預報技術得分，分別針對4個不同的豪大雨狀況進行雨量預報技術得分之校驗，即50、75、100、與130公厘，模式在鹽水溪流域預報值的得分分別是0.56、0.69、0.67、與0.75，顯示著鹽水溪流域利用模式預報颱風定量降雨對豪雨個案(總雨量大於130公厘的颱風個案)有良好的掌握能力。

模式結果已應用在今年桃芝颱風侵台期間做定量降雨預報，由於桃芝颱風結構特殊，近颱風中心處，模式預報值較觀測降雨量為低，遠離颱風中心處，模式預報值較觀測降雨量為高。

一、前言

台灣位於西北太平洋颱風主要路徑上，根據中央氣象局過去50年(1946-1995年)資料顯示平均每年約有27個颱風形成於西北太平洋，約占全球的1/3，其中約4個颱風影響到台灣，2個颱風會自台灣陸地登陸；颱風所帶來的災害主要係颱風伴隨的強降雨，導致洪水及土石流等天然災害，今(2001)年影響台灣的颱風不但數量大增，且強降水所導致的災情更較往年嚴重，故如何在氣象防災研究上再予加強，尤其是颱風伴隨的雨量特性的瞭解及雨量預報模式之建立等工作，實刻不容緩。

本研究的目的是在於進一步探討颱風伴隨的雨量特徵，及建立高解析度氣候統計定量降雨模式，前者於第二節中做一探討，後者將詳細說明於第三節中，此外，模式應用在今年桃芝颱風警報期間，與觀測值的比較將詳述於第四節，最後，於第五節做一結論與討論。

二、侵台颱風伴隨降雨特徵分析

侵台颱風伴隨降雨所導致洪水、土石流災害，往往造成重大的財產及生命損失，故對侵台颱風伴隨降雨之特徵實有必要詳加瞭解，以下將針對颱風侵台期間測站雨量與颱風中心距離之關係、及測站雨量與地形高度進行研究。

首先各測站與颱風中心距離的計算方法，乃根據各測站的位置與即時颱風中心位置計算而得，每一個計算出的距離會配合一個相對應的該測站、該時間的時雨量資料。處理時並將不同的距離分成每25公里的間隔，共計40個間隔(0-1,000公里)；然後將每一個間隔中的所有距離以及雨量都加以平均，亦即在該間隔中求得一個距離的平均值和一個雨量的平均值。

圖一顯示台灣地區各測站於1989-1996年颱風期間日雨量(公厘)隨颱風距離愈近的變化情形。如圖所示，離颱風中心距離愈近，日雨量值愈大，距離颱風中心25公里以內，

日雨量可達 200 公厘，之後隨距離越遠，日雨量值越小。離颱風中心 150 公里至 300 公里間，日雨量值維持在 100 公厘左右；300 公里以外地區，日雨量值則再逐漸減少。比較本分析結果和以前的研究成果(如 Frank, 1977; Gray, 1981)，顯示本研究所分析的日雨量，在半徑 200 公里以內平均為 120 公厘，半徑 200-400 公里內則約為 68 公厘；而過去之研究在 2° 緯度(222 公里)半徑內，日雨量約為 80-100 公厘，2-4° 半徑內則約為 25-35 公厘，亦即本分析之日雨量稍大；導致此差異的原因，可能在於過去的研究皆盡量避開陸地地形對颱風伴隨降雨可能造成之影響。

如前所述，台灣由於地形複雜，各地雨量的分佈除了受颱風本身環流的影響外，尚受地形的影響；而地形對颱風降雨的影響主要來自於地形強迫舉升氣流的機械作用。處理不同海拔高度測站所觀測之雨量變化時，我們將海拔高度 2,000 公尺以下的測站分成每 200 公尺一個區間；2,000 公尺以上則每 500 公尺一個區間(考慮資料筆數的代表性)，共計 14 個區間；然後將每一個區間中的測站海拔高度值及對應的雨量值都加以平均，亦即在該區間中求得一個高度的平均值和一個日雨量的平均值。此外，在繪製伴隨颱風降雨的垂直分佈圖時，係考慮距颱風中心半徑 50 公里內所有測站，目的是檢視颱風雨量和高度的關係是否會隨距離颱風的靠近而改變。

圖二顯示在颱風半徑 800 公里以內，高度 700 公尺、1,300 公尺、2,000 公尺及 2,500 公尺左右，有極大值出現；此分析結果顯示，颱風伴隨雨量和台灣的地形(以及風向)有相當顯著的關係。然而，上述的分析結果似乎和過去的研究有相當程度的差異。如魏等(1972)統計侵台颱風雨量的結果，顯示在垂直高度 850-950 公尺間有一最大雨量集中帶。李(1997)的分析則顯示，在高度 400-500 公尺以及 2,500-3,800 公尺兩處有雨量的極大值。王(1977)的研究則發現台灣地區上空 850-750 hPa(約 1,500-3,000 公尺)及 700-550 hPa(約 3,000-5,000 公尺)為颱風期間水汽飽和層所在；然而，王並未進一步指出水汽飽和層和最大雨量集中帶之間的關係。因此，颱風雨量在垂直高度上的變化關係，似乎尚待進一步的分析證實。未來在做進一步的雨量-高度分析時，除了考慮測站本身所在的高度外，應考慮該測站相對於地形的走向(順風坡或背風坡)和盛行風的風向(和颱風路徑有關)，以瞭解颱風伴隨之地形雨帶對不同地區(測站)所造成的影響。

三、定量降雨模式之建立

本研究嘗試利用歷史(1989-1998 年)侵台颱風(共計 40 個颱風)，針對台灣各流域或某一測站，建立一高解析度氣候統計定量降雨(Quantitative Rainfall Prediction)模式，預報颱風侵台期間逐時雨量，研究的範圍為(19-27°N, 118-126°E)，水平解析度為 0.1° 經緯度(約 11 公里)，共計 6,561(81x81)網格點。本模式是類似於王(1983)0.5° 經緯度平均法之模式(共計 256 個網格點)，唯王(1983)之模式有部份網格點係空白，即沒有歷史颱風經過。

進一步探討原因，係樣本資料的空間分佈，由於目前大部份的氣象遙測站的建置時間多不超過十年，因此對應的颱風個案數目前僅介於 18-40 個之間，其路徑在模式範圍內的空間分佈並非很均勻，尤其是對颱風個案數較少的測站而言，模式範圍內會有一些網格沒有樣本資料(譬如 21-23°N, 119-121°E)，導致日後利用颱風路徑預測某地降雨量的困難。

為解決上述預報上的困難，本研究提出利用 Barnes 客觀分析法(1964)，進行空出時雨量資料的迴歸與平滑，建立一組空間分佈均勻網格資料，並將原有解析度由 0.5° 經緯度提昇 0.1° 經緯度，以預報颱風於台灣附近時，某一流域或任一站的時雨量。

3.1 Barnes 客觀分析法的應用

Barnes 客觀分析法(Barnes, 1964; Barnes, 1973)是應用在氣象上眾多客觀分析法中的一種逐次修正法。其基本理論是任何一個網格點上的值可以先在網格上假設一個初始場，然後利用網格周圍的觀測資料來做逐次的修正。若以 ϕ_g 表示任一氣象變數在網格點 g 的值，則逐次修正法可以

$$\text{下式表示: } \phi_g^m = \phi_g^{m-1} + \frac{\sum_{i=1}^N \omega_i (\phi_{i0} - \phi_{ia}^{m-1})}{\sum_{i=1}^N \omega_i}, \text{ 其中,}$$

ϕ_g^m , ϕ_g^{m-1} 為網格 g 上第 m 次及第 $m-1$ 次的分析值， ϕ_{i0} 為網格點周圍第 i 個測站的觀測值， ϕ_{ia}^{m-1} 為第 i 個測站第 $m-1$ 次的分析值(由周圍四點網格分析值內插平均而得)， ω_i 為第 i 個測站對網格點 g 的權重因子(weighting factor)， N 為在網格點周圍參與內插的測站總數。Barnes(1973)將權重

函數訂為： $\omega_i' = \exp(-\frac{\gamma_i^2}{4\eta k})$ ，其中， η 的設定是

為了降低 k 值，以便增加分析的收斂速度，其理想值為 0.2~0.4(Barnes, 1973)。

我們在利用 Barnes 方法分析雨量分佈時，首先針對實際的觀測資料進行測試分析，以決定方法中各主要參數的值(如網格距離、 k 值、影響半徑等)。林和陳(1987)在探討 Barnes 方法中影響半徑的選擇對分析結果的影響時，發現不同 E 值($E=1\sim5$)的設定會影響其分析結果，其中，當 E 值取 4(也就是 $R = 4\sqrt{k}$)時，分析結果最為理想，且計算最有效率；因此，在本研究中我們依林和陳(1987)的結論取 $E=4$ 。其它參數的設定包括：影響半徑為 200 公里， K 值為 2500km²， η 值為 0.3，以及收斂條件為 $|\phi_{i_0} - \phi_{i_0}^{m-1}| - |\phi_{i_0} - \phi_{i_0}^m| < 0.01$ 。

3.2 鹽水溪流域定量降雨模式結果討論

本研究針對鹽水溪、高屏溪、大甲溪、烏溪、濁水溪、淡水河及蘭陽溪，七個流域，共計完成 161 個雨量站氣候統計定量降雨預報圖，為方便討論，以下將以鹽水溪流域平均之預報圖為示範流域進行討論。

圖三為鹽水溪流域利用模式所得之颱風定量降雨預報圖，圖中的雨量等值線間距為 3mm/hr，此外，圖中並以顏色區分不同雨量或比值範圍，黃色區域代表時雨量介於 6~9 公厘，綠色區域代表 9~12 公厘，紅色區域為 12 公厘以上。

圖三顯示，颱風伴隨之較大平均時雨量多集中於東經 119°-122°、北緯 23°-26° 之間這塊 3° x 3° 的網格區域中，亦即台灣本島以及向西延伸約 1-2° 經度的地區，也就是說，當颱風中心位於該區域時，鹽水溪流域及各測站會有較大的降雨，較大雨量均呈類似 U 字型分佈，亦即當颱風中心位於台灣西北近海向東南方延伸，經台灣北部、東部，再從花蓮向西延伸至嘉義、台南、雲林一帶，出海後再延伸至大陸福建沿海(金門、馬祖之間的這塊區域時，鹽水溪流域會有每小時超過 6 公厘以上的降雨發生；在此 U 字型地帶的某些區域中，如在台灣北部及雲林縣沿海附近，時雨量甚可達 15-20 公厘。

圖四為颱風在台灣附近移動時，鹽水溪流域出現豪雨的機率分佈圖。圖中每一個網格中均包含 4 個數值，即最大時雨量、豪雨發生機率(%)、豪雨出現次數、以及總過境次數。例如，在 120-120.5°、23.5-24° 的網格，在過去十年中共有 30 筆颱風過境資料，其中出現豪雨的次數為 9 次，出現機率為 30%，出現最大時雨量為 27.5 公厘。如圖所示，當颱風中心位於台灣的西南沿岸或是北部、東北部地區時，鹽水溪流域出現豪雨的機率一般超過 20%，在預報時值得特別注意。

針對鹽水溪流域平均而言，自 1989-1998 年十年颱風(伴隨降雨觀測總雨量為 2,401 公厘，模式計算總雨量為 2,254 公厘，相差僅 147 公厘，顯示此模式在鹽水溪有非常好的預報能力。

3.3 鹽水溪流域定量降雨模式預報技術得分校驗

為校驗模式預報正確率，本研究採用的方法是計算「預報技術得分」(Threat Score)，其公式如下：

$$TS = \frac{C}{A + B - C}$$

其中， A 是觀測值大於某一預設值的個案數， B 是預報值大於該預設值的個案數， C 是觀測值與預報值均大於該預設值的個案數亦即預報正確的個案數。在此，我們分別針對 4 個不同的豪大雨狀況進行雨量預報技術得分之校驗，即 50、75、100、與 130 公厘。例如取預設值等於 50 公厘時， A 代表在所有校驗的颱風個案中，觀測總雨量超過 50 公厘的個案數， B 代表預報總雨量超過 50 公厘的個案數， C 則為觀測總雨量和預報總雨量均超過 50 公厘的個案數。除了上述的預報技術得分以外，我們並計算各個模式「前估」(pre-figurance)以及「後符」(post-agreement)的能力；所謂「前估」是指在所有觀測值大於某一預設值的個案當中，預報正確的百分比，亦即在所有實際發生豪大雨的個案中，模式能預測到的百分比，也就是上述公式中的 $\frac{C}{A}$ ；而「後符」則指在所有預報值大於某一預設值的個案當中，預報正確的百分比，亦即在所有預報的豪大雨個案中，實際發生豪大雨的機率，也就是上述公式中的 $\frac{C}{B}$ 。

表一為鹽水溪流域 1989-1998 年期間 40 個颱風個案的預報技術得分；表中可見，模式在 4 個不同的預設值下的

得分分別是 0.56、0.69、0.67、與 0.75；此意味著鹽水溪流流域利用模式預報颱風定量降雨對豪雨個案(總雨量大於 130 公厘的颱風個案)顯現良好的掌握能力(其得分為 0.75)。

四、颱風定量降雨氣候統計預報法實際個案校驗—桃芝颱風

桃芝颱風之結構相當特殊，一般而言，需地面風速達 17.2 m/s 稱之為輕度颱風，但由桃芝颱風登陸時地面觀測圖(圖五)，僅有靜浦站地面風速超過 25 m/s(50 knots)，其他測站如：花蓮測站 10 m/s(20 knots)、台東側站僅 5 m/s(10 knots)，顯示其強風區和強對流區均集中於民權附近，桃芝颱風中心附近所伴隨的大量降水，係為導致嚴重災情的主因之一。

防災國家型科技計畫辦公室氣象研究群，於桃芝颱風警報期間，利用 Barnes 客觀分析方法改進之氣候統計預報法，進行台灣上述七個流域及雨量站之定量降雨預報，並進行模式預報值與實際雨量觀測值之校驗工作，如表二顯示，大甲溪、高屏溪、烏溪及濁水溪流流域模式預報值均較雨量觀測值為低，淡水河、鹽水溪及蘭陽溪模式預報值均較雨量觀測值為高；另就各流域較多與較少雨量站進行校驗，亦發現相同之現象，即颱風中心經過的地區，模式預報值較相關之河流域或雨量站所觀測到之降雨量較為低，遠離颱風中心之處模式預報值較流域或單站雨量觀測值為高。

五、結論與討論

颱風所導致的降雨與颱風中心的距離有相當密切的關係；一般而言，距離颱風中心越近，雨量越大，且降雨多集中於颱風半徑 300 公里以內的地方；台灣地形對颱風降雨確有顯著的影響，在高度 700 公尺、1,300 公尺、2,000 公尺及 3,800 公尺左右有極大值的雨量出現。

此外，針對鹽水溪、高屏溪、大甲溪、烏溪、濁水溪、淡水河及蘭陽溪七個流域，共計完成 161 個雨量站氣候統計定量降雨預報圖，資料時段為 1989-1998 年，研究範圍 19-27°N, 118-126°E；並利用 Barnes 客觀分析方法修正改進結果，將降雨氣候統計預報圖解析度由原來 0.5° 提升至 0.1° 緯

度經度。為校驗模式預報正確率，本研究採用的方法是計算預報技術得分，分別針對 4 個不同的豪大雨狀況進行雨量預報技術得分之校驗，即 50、75、100、與 130 公厘，模式在預設值下的得分分別是 0.56、0.69、0.67、與 0.75；顯示鹽水溪流流域利用模式預報颱風定量降雨對豪雨個案(總雨量大於 130 公厘的颱風個案)有良好的掌握能力。

上述結果已應用在今年桃芝颱風侵台期間做定量降雨預報，桃芝颱風在登陸時，僅靜浦站風速達 25 m/s，強降雨區均集中在颱風中心附近，由於桃芝颱風結構特殊，故近颱風中心處，模式預報值較觀測降雨量為低，遠離颱風中心處，模式預報值較觀測降雨量為高。

參考文獻

- Barnes, S. L., 1964: A technique for maximizing details in numerical weather map analysis. *J. Appl. Meteor.*, 3, 396-409.
- Barnes, S. L., 1973: Mesoscale objective analysis using weighted time-series observations. NOAA Tech. Memo. ERL NSSL-62, National Severe Storms Lab., Norman OK 73069, 60pp.[NTISCOM-73-10781].
- Frank, W. M., 1977, "The structure and energetics of the tropical cyclone," I. Storm structure. *Mon. Wea. Rev.*, 105, 1119-1150.
- Gray, W. M., 1981, "Recent advances on tropical cyclone research from rawinsonde composite analysis," World Meteorological Organization, Geneva, 407pp.
- 王時鼎、陳泰然、謝信良，1983，“台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，54 頁。
- 王時鼎、陳泰然、謝信良，1985，“台灣颱風降雨特性及其預報研究(二)”，行政院國家科學委員會防災科技研究報告，73-47 號，100 頁。
- 李清勝，1997，“侵台颱風伴隨降水特性分析”，交通部中央氣象局委託計畫報告，CWB-86-2M-03 號，37 頁。
- 林公錦與陳斐美，1987：Barnes 客觀分析法中影響半徑的選擇。大氣科學，15，59-68。
- 魏元恆、謝信良與林民生，1972：颱風特性與台灣雨量之研究。氣象學報，17，1-17。

表一：鹽水河流域預報技術得分校驗(針對 1989-1998 年颱風)

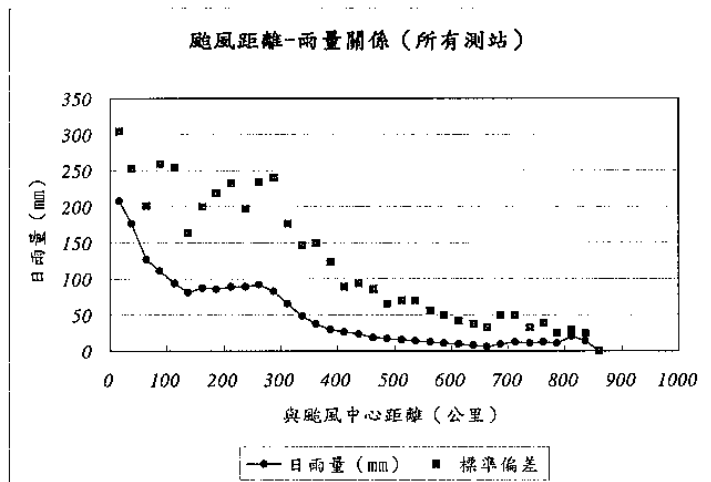
	>50 mm	>75 mm	>100 mm	>130 mm
Threat Score	0.56	0.69	0.67	0.75
前估	1.0	1.0	0.89	0.86
後符	0.56	0.69	0.73	0.86
A	10	9	9	7
B	18	13	11	7
C	10	9	8	6

註: A:觀測總雨量大於預定值的個數，B:預報總雨量大於預定值的個數，C:觀測總雨量和預報總雨量均超過預定值的颱風個數。

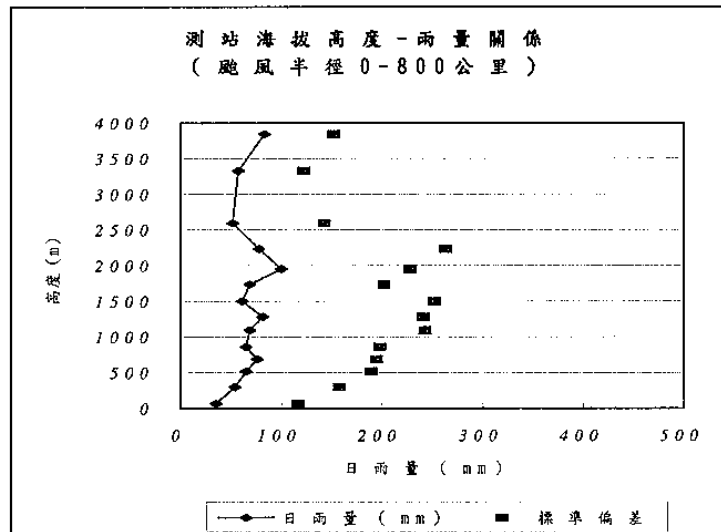
表二：2001 年桃芝颱風定量降雨氣候統計預報法降雨量預報校驗(單位:公厘)

流域名稱		淡水河	大甲溪	鹽水溪	高屏溪	烏溪	濁水溪	蘭陽溪	
流域觀測值		37.4	358.3	28.0	348.4	296.0	401.0	94.0	
模式預報值	實際路徑	165.0	174.0	121.0	205.0	142.0	221.0	315.8	
	預報路徑	203.0	132.0	146.0	221.0	106.0	232.0	219.0	
單站觀測值	多	池瑞 116	雲嶺 474	善化 38	排雲 433	阿眉 424	鳳凰 610	南山 198	
	少	關渡 0.5	梨山 250	和順 11	龍泉 49	雙冬 205	西螺 211	壯圍 39	
模式預報值	實際路徑	多	435.0	225.4	92.5	225.4	225.6	209.2	346.9
		少	86.7	201.2	96.2	74.0	225.5	104.8	205.1
	預報路徑	多	350.9	211.0	120.2	217.4	175.8	221.1	308.1
		少	164.0	159.0	108.2	42.0	135.3	87.4	154.6

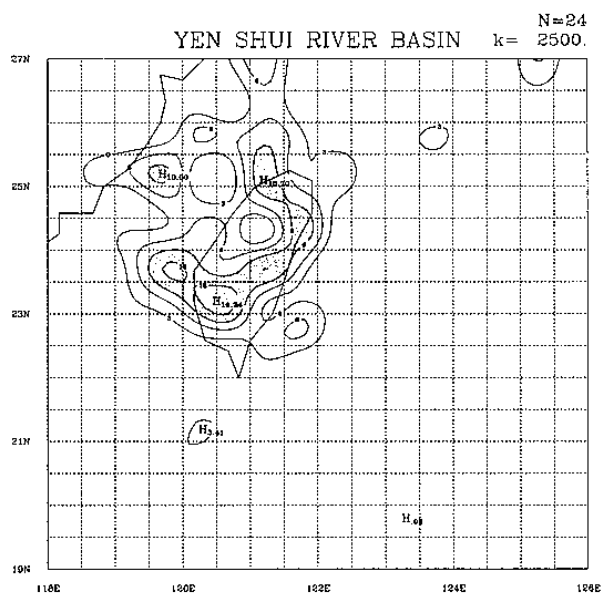
註：實際、預報路徑資料時間 7/29 07：00~7/30 20：00L



圖一: 日雨量與颱風中心距離之關係

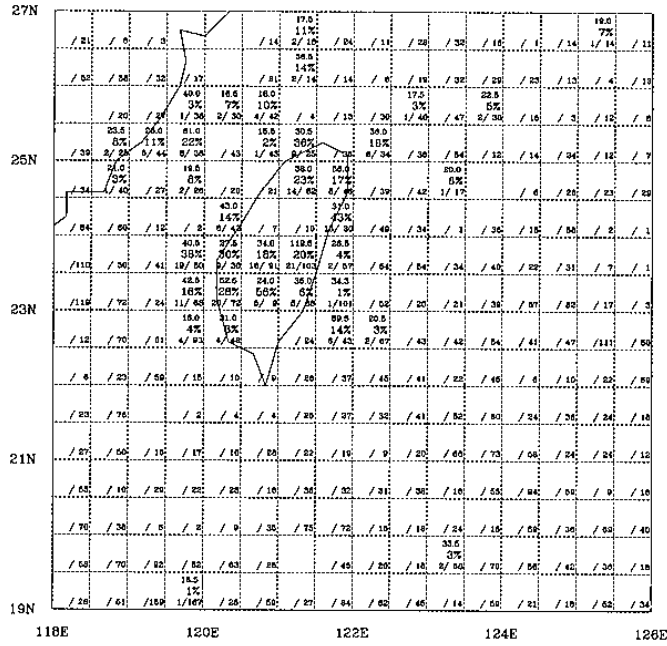


圖二: 颱風伴隨日雨量隨高度之變化 (颱風半徑 800 公里以內)

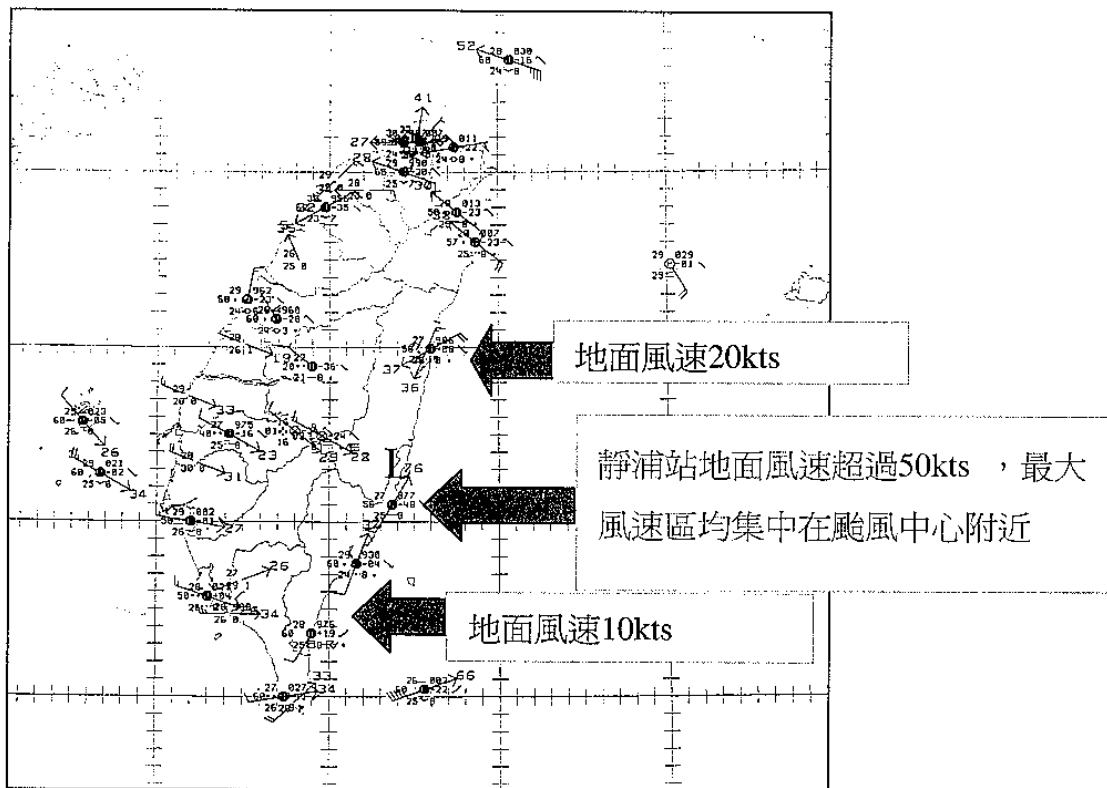


圖三: 鹽水河流域氣候統計定量降雨圖(單位:公厘), 圖中間距為 3 公厘/小時域。

YEN SHUI RIVER BASIN



圖四: 鹽水河流域時雨量大於 15 公厘/小時發生機率預報圖，方格上方為最大時雨量，中間為發發生豪大雨的機率，下方左側為豪雨出現的次數，右邊為颱風過徑次數。



圖五: 2001 年 7 月 30 日 00 : 00L 桃芝颱風登陸時地面觀測資料圖。