

淺談基礎成分法(Ingredients-Based Methodology) 應用於預報劇烈地形降水

戴志輝 顏自雄 潘大綱

空軍氣象中心

摘要

地形的迎風面常是豪大雨發生的有利位置，民國四十八年的八七水災，以及民國八十五年的賀伯颱風，均對台灣地區帶來十分可觀的累積雨量。在美國，由於定量降水預報的需要，如何自綜觀及中尺度特徵中，找到有利於對流發生、發展與維持的環境，成為作業界十分關心的課題。本文從豪大雨發生的簡單概念出發，探討劇烈地形降水的共同特徵，並且檢驗各項有利的基礎成分；由於其概念模式簡單且十分清晰，值得介紹給作業人員了解並加以運用。

數值模式能將定性的概念，藉由數字轉化為具體的呈現，各項基礎成分的量化就變的可行，因此幾乎全世界的氣象作業單位，均有數值模式作為定量預報的依據。雖然建構、維持及妥善運用屬於本聯隊的數值模式，需具備大量的人力、物力、時間及專業知識，但透過越多概念模式的認知，未來才有機會在數值模式的使用上運用自如。

民國八十五(1996)年賀伯侵台期間，強風暴雨對本軍雖未造成重大災損，但就氣象專業角度而言，瞭解其降水成因，除了增加對物理過程的認識外，對於模式模擬而言，也是一項重要的驗證過程；此外，台灣地區夏季颱風過後常伴隨西南氣流，並造成局部地區出現較大雨勢，透過基礎成分分析，亦可有效評估其引發豪大雨的潛勢。

關鍵字：基礎成分法、定量降水預報

(2002年08月10日收稿；2002年08月16日完稿)

一、基礎成份法的理論架構

自1950年代起，暴洪(flash flood)預報就被美國氣象作業界所關注，儘管暴洪的發生往往是水文學(hydrology)和氣象學相互應用的產物，預報過程中不僅需了解暴雨之成因及過程，對於地貌、河川分布及排水工程亦應加以考量，然而終結而言，劇烈降水才是暴洪發生的根本原因；因此，成功的預估定量降水，才是成就洪報預報的基礎任務。

為此，Doswell等人(1996)提出了一個十分簡潔的概念，來說明劇烈降水可能的基礎

組成成分；即

$P = \bar{R}D$ ，其中 p 為總降水量， \bar{R} 為降水率， D 為降水時間。又

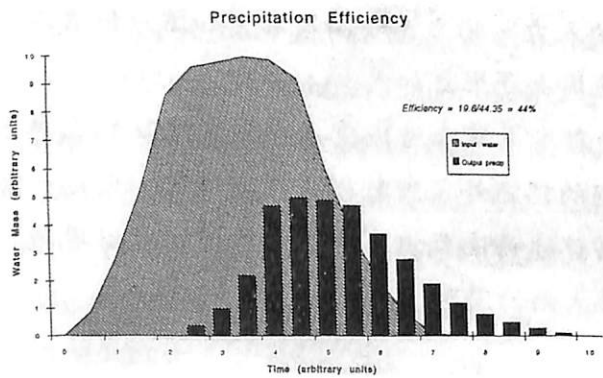
$\bar{R} = Ewq$ ，其中 E 為降水效率， w 為垂直運動速度， q 為上升空氣的混和比。

由於劇烈降水常由對流系統造成(也有一些冬季降水個案並非由對流所造成，如2001年Wetzel and Martin的文章)，因此降水時間 D 可由對流系統的空間尺度 L_s 與移動速度 C_s 求得，雖然不同對流系統型態，如飆線、中尺度對流複合體、超大對流胞等

等的 L_s 、 C_s 計算方式不盡相同，但原則卻十分相近，如此我們可以表示成

$$D = L_s / C_s$$

由於對流系統內的對流胞處於不斷的消長狀況，降水效率 E 其實很難定量評估，因此企圖去計算單一對流胞的降水效率是沒什麼意義的；反之應該是評估對流系統在降水過程中的水相變化情形，進而能夠瞭解當水汽供應到對流系統內之後，凝結、降水、蒸發及雲體飄移的大致狀況；Doswell 等人 (1996) 認為，凝結是在水汽供應之後才發生，而凝結的水(雲)還會飄移及蒸發，因此真正能降至地面的雨量會較凝結量少，其適當的概念如圖一。



圖一 Doswell 等人(1996)對「降水系統生命週期內，水氣進入量與降水量時間變化趨勢」之詮釋。橫座標為系統時間階段，0-3 階段為發展期，3-6 階段為成熟期，6-10 階段為消散期；將降水量與之水氣進入量相除即為降水效率。

當地形因素被考慮時，垂直運動的計算就變得稍複雜些，即

$$W = W_{env} + W_{oro}$$

其中 W_{env} 是由環境提供的垂直運動， W_{oro} 則是地形的抬升效果。

$$W_{oro} \text{ 可以再改寫成 } W_{oro} = V_H \times \nabla h$$

其中 V_H 是低層風速， ∇h 是地形的高度梯度，

也就是地形海拔在水平方向上的變化率。

因此，完整評估劇烈地形降水的基礎成分法，應為

$$P = E(V_H \cdot \nabla h + W_{env})q L_s / C_s \text{ ----- (1)}$$

實際應用於天氣診斷時， W_{env} 可透過 Q 向量或 ω 方程加以評估，而這些資訊在現行的氣象網頁中都可以找的到； V_H 是地面(或模式地表以上最低層)風垂直於地形的分量；台灣西部平均地形高度梯度 ∇h 約為 0.033(Lin 等人, 2001)； q 的值及其垂直變化可透過斜溫圖加以準確評估；至於 E 雖難以量化，但若可預期雲底高度越低，且低層水氣量越大時，其對劇烈降水的貢獻應越大。

二、利於發生劇烈地形降水的綜觀與中尺度特徵

Lin 等人於 2001 年利用(1)式，對歐、美及東亞地區的數個劇烈地形降水個案作了詳細的評估，足以顯示(1)式的通用性，將其結果摘要整理略述於後：

(一)、利於美國中、西部發生劇烈地形降水之特徵：

1. 上、下游分別有中、上對流層槽接近及深厚之脊線，且呈現準靜止(quasi-stationary)狀態。
2. 500hPa 有短波槽接近，鋒面呈現緩慢移動或靜止狀態。
3. 深厚的暖、濕氣層。
4. 高 θ_e (相當位溫) 值之低層噴流(LLJ, low level jet)。
5. 地形或冷鋒舉昇。
6. 中、高對流層導引駛流微弱。

(二)、利於歐洲阿爾卑斯山區發生劇烈地形降水之特徵：

1. 上對流層準靜止狀態之脊線。
2. 上對流層接近之短波槽。
3. 吹向地形之潮濕 LLJ。
4. 地形陡峭且地貌有利於低層合流(confluent)。

(三)、利於東亞地區發生劇烈地形降水之特徵：

1. 颱風(或熱帶低壓)引發之 LLJ。
2. LLJ 具有高條件性不穩定度(高對流可用位能(CAPE)值)。
3. 陡峭之地形。
4. 系統本身在其他(如雙颱風)效應作用下，移動緩慢。

三、發生劇烈地形降水之共同特徵

Lin 等人 (2001) 分析所有劇烈地形降水個案後，發現有些基礎成分是一再重複出現的關鍵因素，它們分別是：

1. 高(至少可預期不會太差)降水效率。
2. 強 LLJ(V_H 大)。
3. 陡峭地形(∇h 大)。
4. 地貌有利於低層合流($V_H \cdot \nabla h$ 大)。
5. 夠強的綜觀尺度上升運動(W_{env} 大，有助於加強低層之垂直速度)。
6. 夠深厚的潮濕氣層(q 大)，且低層特別潮濕(具有條件性或潛在性不穩定度)。
7. 已存在且範圍夠大的對流系統(L_s 大)。
8. 對流系統移動緩慢(C_s 小)。

這些因素是可以被量化(至少在作業上是很容易作定量評估)的，且 q 、 ∇h 、 V_H 、 W_{env} 及 $CAPE$ 的估計值，幾乎就已可決定劇烈地形降水發生的可能性(如表一)！而根據 Lin 等人 (2001) 的結論， $(q \cdot V_H \cdot \nabla h)$ 的重

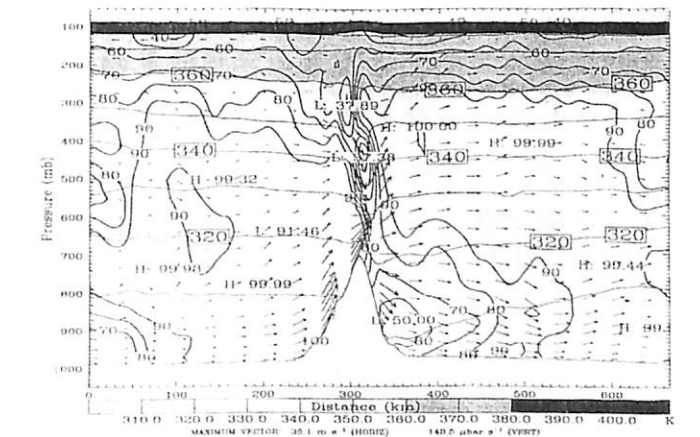
要性特別顯著，其與累積降水量之間似乎存在著相當程度的關聯性。

四、利用基礎成分法驗證劇烈地形降水

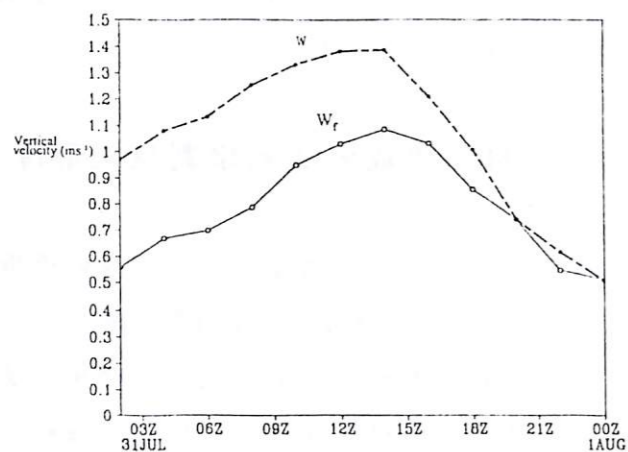
透過一至三節所陳述的概念，我們選取民國八十五(1996)年的賀伯(HERB)颱風，及九十一年七月十七日中南部大雨的個案，嘗試著檢視一下基礎成分法對於台灣地區發生劇烈降水的掌握能力，其分析結果略述於後：

(一)、賀伯颱風環流造成之劇烈地形降水

根據 Wu 等人(2002)利用 MM5 對賀伯颱風登陸前後的模擬結果顯示，除了模式解析度對預測降水量相當敏感(解析度越高，模擬所得之降水量越大)之外，自地面至 500hPa 的深厚暖(高相當位溫)、濕(高相對溼度)西南氣流(如圖二)被地形(阿里山)舉升，造成山區的劇烈垂直運動(如圖三)，應是豪大雨發生的主要原因。



圖二 Wu 等人(2002)對賀伯颱風登陸時所作數值模擬。橫座標為東西向剖面，粗實線為相對溼度，細實線為相當位溫，→ 方向表示風向、長度為大小。由相對溼度與相當位溫之垂直分布，顯示偏西風過山後產生明顯山岳波結構，另背風側低層有明顯焚風效應。



圖三 Wu 等人(2002)對賀伯颱風侵台期間所作之數值模擬。橫座標為時間序列，縱座標為垂直速度。W 為近阿里山區模式最低層之平均垂直速度，Wf 為地形強迫之垂直速度分量。

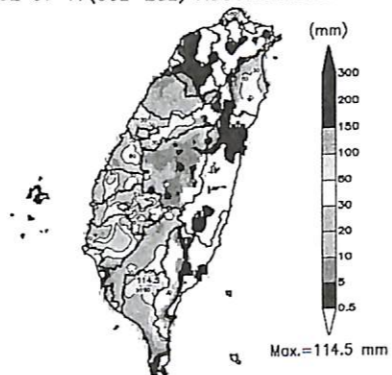
由於高相當位溫及高相對溼度代表大氣所含實際水氣量極大(即具有高混比)，特別是在中、低層相當位溫或水氣含量分布，呈現明顯之垂直遞減結構時，潛在性不穩定度十分容易透過垂直運動釋放出來；在賀伯颱風登陸前後，由於低層水氣含量豐沛，舉升凝結高度偏低，受阿里山阻擋的氣流舉升後，將其潛在不穩定度完全釋放出來，換言之，透過第三節概念 1 至 8 項，即不難理解賀伯颱風會在迎風面的阿里山區造成豪大雨的原因。

(二)、西南氣流造成之劇烈地形降水

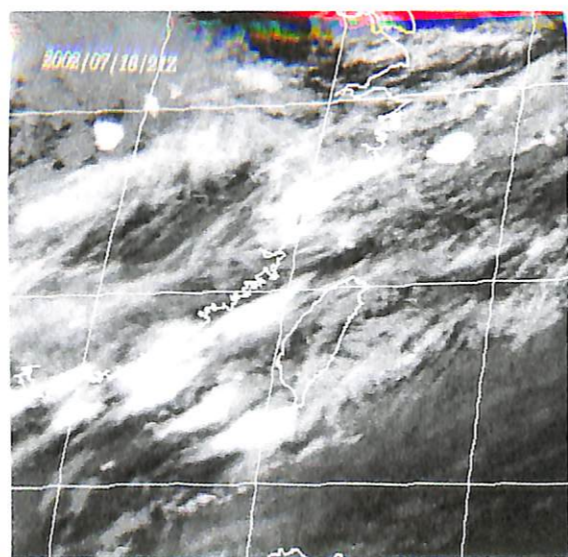
今年(民國九十一年)七月中旬，哈隆颱風自琉球群島海域向北移行後，將西南氣流引進台灣地區，在七月十七日(如圖四)至十八日(七月十八日全日累積雨量分布型態與圖四類似)間，累積了相當可觀的雨量，逐時降水型態統計分析(如表二)顯示，此段期間中南部地區對流活動十分活躍；由紅外線衛星雲圖亦顯示，對流雲系於七月十六日

2100UTC 即已出現於高、屏西方外海(如圖五 a)；七月十七日 0000UTC 原對流雲系進入陸地前有減弱跡象，但於海岸附近有對流新生(如圖五 b)；0300UTC 對流雲系強度增強(如圖五 c)，並持續至 0600UTC 以後；0900UTC 南部地區對流強度逐漸減弱，然中部沿海開始有對流新生(如圖五 d)，其強度至 1200UTC 後逐漸減弱。

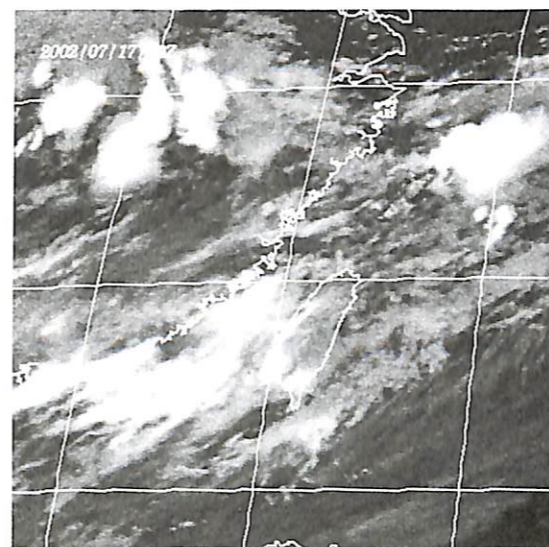
2002 07 17(00L-23L) ACCUMULATIVE RAIN.



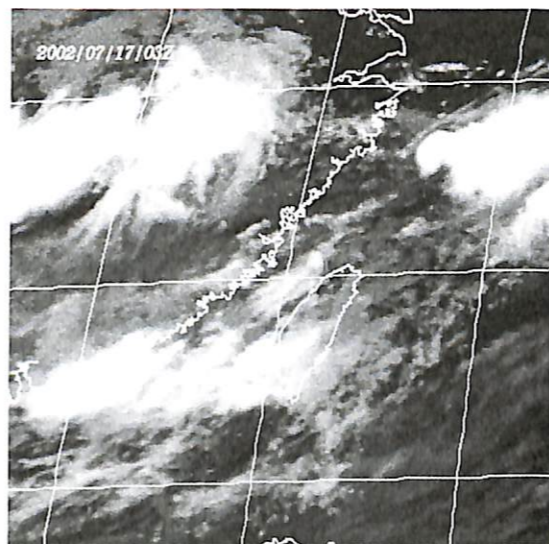
圖四 九十一年七月十七日台灣地區全日累積降雨量。



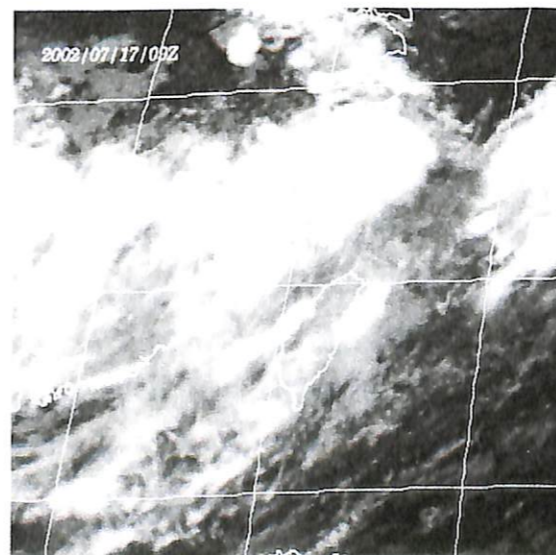
圖五 a 九十一年七月十六日 2100UTC 紅外線衛星雲圖。



圖五 b 十七日 0000UTC 紅外線衛星雲圖。



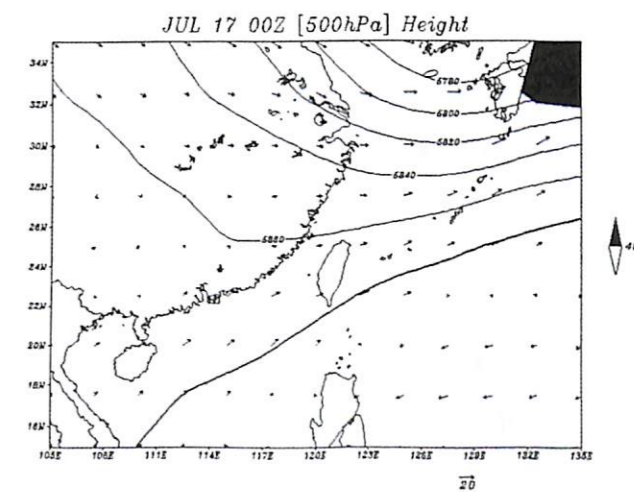
圖五 c 續圖六 b，但為 0300UTC。



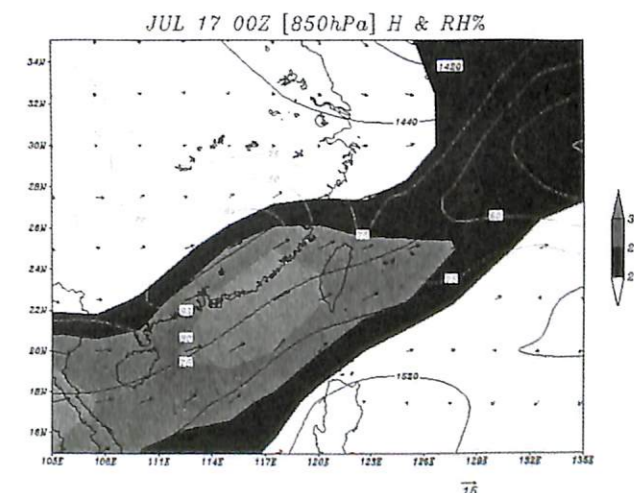
圖五 d 續圖六 b，但為 0900UTC。

透過第三節概念 1 至 8 項，對七月十七日 0000 及 1200UTC 綜觀環境加以評估後，可歸納出以下特徵：

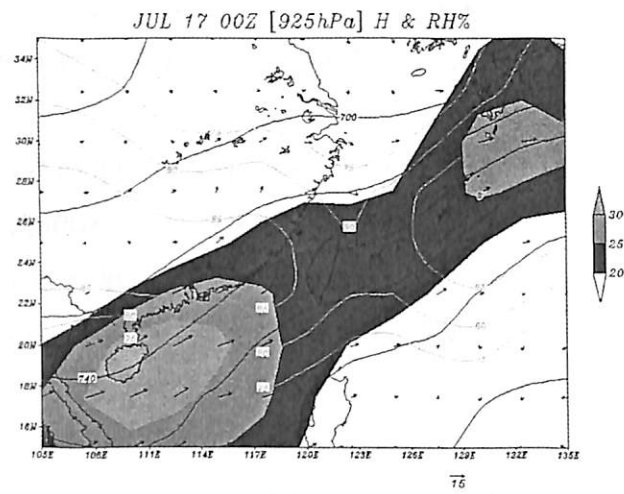
1. 七月十六 1200 至十七日 0000UTC(如圖六 a)間，台灣地區位於 500hPa 槽前，顯示綜觀環境應足以提供微弱上升運動(W_{env})；850 至 925hPa(如圖六 b 及 c)西南風風速約為 10 至 20kts；此外，高相對溼度區正逐漸向東南東方移動，朝台灣地區接近中。



圖六 a 九十一年七月十七日 0000UTC 500 hPa 天氣圖。

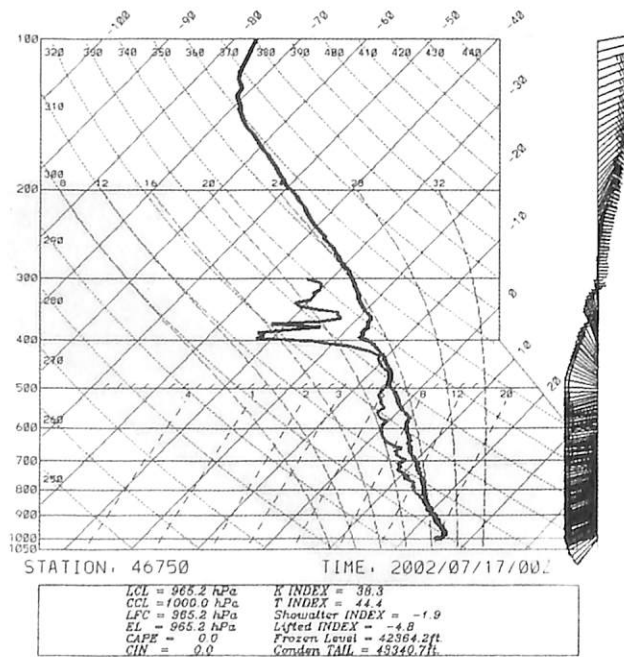


圖六 b 續圖六 a，但為 850hPa。



圖六c 續圖六b，但為850hPa。

2. 七月十七日 0000(如圖七)及 1200 UTC (型態與 0000UTC 類似)屏東探空顯示地面附近混合比已近 20g/Kg、低層混合比具有潛在性不穩定結構、中低層(400hPa 以下)相對溼度偏高(大氣容易飽和)利於潛在不穩定度之釋放、舉升凝結高度非常低，及中低層風場(風速均為 10kts 以上)與山脈間交角明顯等有利對流發展因素。



圖七 七月十七日 0000UTC 屏東探空。

3. 仿照表一，並考慮陸地摩擦效應對低層風速的減弱效果後，估計此個案($q \cdot V_H \cdot \nabla h$)的值應為 6.6-，與 Lin 等人(2001)對台灣地區 1999 年劇烈地形降水個案的分析結果已相去不遠。

(三)、討論

由上述兩個案的檢驗結果，顯示不論就數值模擬或天氣診斷的角度而言，基礎成份法的確(即使在定性上)可提供相當程度的指引，足以讓我們在實際作業中能夠有所依據。

五、結論

Doswell 等人(1996)及 Lin 等人(2001)兩篇文章均以評估降水量為重點，雖然豪大雨並非本聯隊守視及預報的重點，但因豪大雨是對流系統的產物，因此基礎成份法的概念，仍可應用於評估劇烈對流發生的潛勢，足以作為守視及預報對流潛勢時的參考；然而有幾個觀念仍需稍加說明，才能使整個模式在概念及應用上更為完整：

(一)、定量評估絕非唯一的臨界標準

表一所列出的各項基礎成分雖有漂亮的定量評估，但絕非唯一的臨界標準，畢竟個案之間必定會有差別，因此天氣圖的診斷仍然是極為重要的；唯一的標準大概只有找出一切能夠幫助條件或潛在不穩定度釋放出來的因素，也就是找出增加中、低層垂直運動的原因。

(二)、水汽十分重要

當低層水汽含量大，且使低層水汽含量在垂直結構上出現 $\partial q/\partial z$ (或 $\partial \theta_e/\partial z$) <0 時，大氣就變的具有條件性不穩定，所以準確評估水汽量十分重要；透過斜溫圖，找尋露點所對應的混和比，就是實際的水含量，由於

實際的水含量是溫度與氣壓的函數，因此相對溼度(或 $T-T_d$)值並不能代表實際水含量。最明顯的例子，就是東北季風與西南氣流探空結構的差別，東北季風常具有超過 95%的低層高相對溼度，然而因為低溫，實際含水量卻往往在 10g/Kg 以下，但西南氣流 70%的相對溼度，卻因高溫而可以容納 20g/Kg 以上的含水量，這是在使用斜溫圖時，必須先建立的基本認知。

(三)、善用密集地面觀測報告

局部環流(如海陸、山谷風)是另一項重要因素；目前國軍氣象網頁提供逐半時至十分鐘乙次的密集地面觀測報告，在找尋局部輻合或抬升時應有不錯的指引。

(四)、密切的聯繫

密切的意見溝通與交換，是做好對流天氣守視的最後一道防線；透過密切的聯繫，才有機會掌握對流發生前後，局部環境特徵的演變過程，這是十分重要的事。

(五)、對數值模式的態度

除了概念模式的建立之外，實際數學及物理模式的建立更為重要；目前本聯隊常參考 JMA、EC、NOGAPS、COAMPS、AVN 及 MM5 等數值模式產品，也累積了不少的使用經驗，但唯有建立屬於自己的作業模式，才能讓我們有機會看到天氣過程；如果對於模式的態度，不再只滿足於作一個單純的使用者，那麼從數值模式的積分格式、物理過程(積雲對流、邊界層處理等)的參數化、初始資料的改進(颱風植入、客觀分析、衛星及雷達資料同化等技術)及雲微物理過程的研究等，都將會是我們會面臨到的困難，這個部分其實需要大量具備氣象或資訊專業背景的人力資源，但完成之後絕對可以大幅提昇本聯隊的作業效能。唯有透過不

斷充實專業知識，才有機會完成這項宏願。

六、誌謝

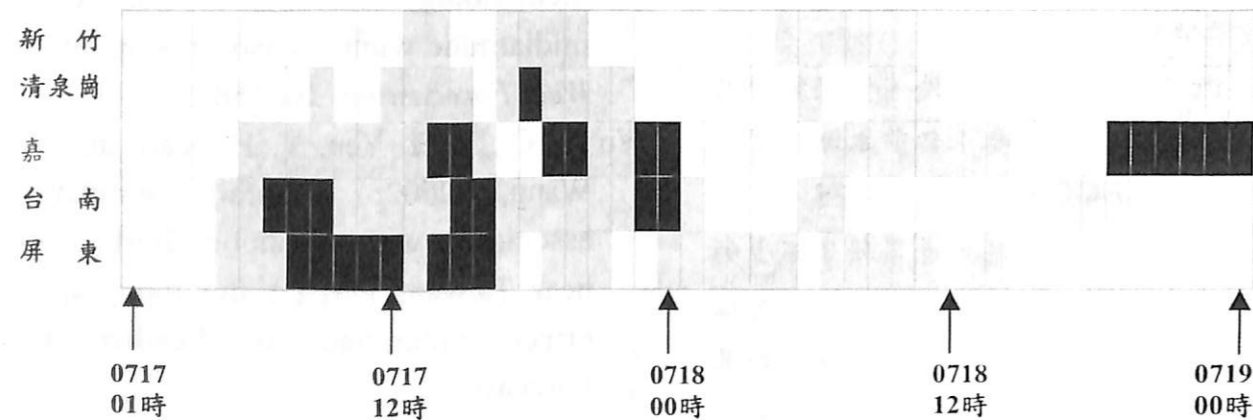
氣象中心鳳錦暉、蘇世穎氣象官及姚西子上士協助歷史資料蒐整與製作，在此一併提出致謝。

七、參考文獻

- Lin Y. L., S. Chiao, T. A. Wang, M. L. Kaplan, and R. P. Weglarz, 2001: Some common ingredients for heavy orographic rainfall. *Wea. Forecasting*, **16**, 633-660.
- Doswell C. A., III, H. E. Brooks, and R. A. Maddox, 1996: Flash flood forecasting: An ingredients-based methodology. *Wea. Forecasting*, **11**, 560-581.
- Wetzel, S. W., and J. E. Martin, 2001: An operational ingredients-based methodology for forecasting midlatitude winter season precipitation. *Wea. Forecasting*, **16**, 156-167.
- Wu C. C., T. H. Yen, Y. H. Kuo, and W. Wang, 2002: Rainfall simulation associated with Typhoon Herb(1996) near Taiwan. Part I: the topographic effect. Submitted to *Weather and Forecasting*.

An estimate of the contributions from some common ingredients							
Events	LLJ (U in m/s)	Mountain slope ($\nabla_h = \delta h / \delta x$)	q (q/Kg)	Index [$U(\delta h / \delta x)q$]	W_{env} (synoptic system)	Max rainfall rate(mm/day)	CAPE
Taiwan(1999)	10.0	0.033	21.0	6.9	No	200	2099
Taiwan(1959)	17.5	0.033	22.0	12.7	No	500	2406
Japan	17.5	0.020	19.5	6.7	No	150	1149
Big Thompson	12.5	0.025	16.0	5.0+	Trough	915	2526
Rapid City	12.5	0.020	13.5	3.4+	Trough	1143	-----
Fort Collins	10.0	0.021	13.0	2.7+	Trough	519	628
Madison County	12.5	0.025	16.0	5.0+	Trough	600	286
France	15.0	0.027	15.0	6.1+	Trough	300	2662
Italy	13.0	0.033	11.0	4.7+	Trough	250	212
Switzerland	10.0	0.033	9.3	3.1+	Trough	260	383
Italy	12.5	0.033	11.5	4.74+	Trough	300	90

表一 Lin等人(2001)對十一次劇烈地形降水個案，分析重要基礎成分對降水量之貢獻。



表二 七月十七至十八日逐時降水型態分析。其中灰色為降雨、黑色為雷雨；每一格代表該小時內降雨或雷雨(含測站或視區)達半小時以上。

Application of an Ingredient-based Methodology on Orographical Heavy Precipitation Forecast

Jyh-Huei Tai Tzu-Hsiung Yen Peter Da-Gang Pan
Weather Center, C.A.F., R.O.C.

Abstract

Orographical heavy precipitation events were frequently observed around the Central Mountain Range (CMR) through the years. Although quantitative precipitation forecast (QPF) has long been a major issue to forecaster, to understand the physical processes and further grasp the changes of environmental conditions favorable for heavy precipitation are by no means an easy task. Based on simplified thermal and mechanical aspects, the ingredient-based methodology for orographical heavy precipitation was introduced. Same method was used to examine two cases that caused heavy precipitation in Taiwan.

Our results indicate that ingredient-based methodology provides a clear and easy way in examining all possibilities that lead to the occurrence of heavy precipitation events. In one of the southwestly prevailing flow case, which occurred in 2002, we noticed the ingredients proposed by pre-researchers were critical. Similarly, heavy precipitation case near A-Li Mountain due to the land falling of typhoon Hurb 1996. Through a simulation study using MM5 as an aid in reproducing the same event, our results demonstrate that the basic ingredients are critical and applicable.