

近期梅雨鋒面研究之回顧

陳 泰 然

國立台灣大學大氣科學研究所

(中華民國九十三年二月四日收稿；中華民國九十三年八月九日定稿)

摘 要

本文回顧近年來華南/台灣與長江梅雨鋒之研究，除探討梅雨降水在季節降水分布之重要性外，亦探討梅雨鋒之氣候特徵與台灣地區梅雨鋒降水。在梅雨鋒結構方面，除探討其特殊性外，亦探討伴隨之垂直次環流。最後探討梅雨鋒與對流之關係，及對流潛熱釋放在梅雨鋒生過程所扮演之角色。

關鍵詞：梅雨鋒、垂直次環流、梅雨鋒生、梅雨降水

一、前 言

東亞地區獨特的梅雨現象，其伴隨的多變天氣與降水，均與農業、經濟活動、水資源利用及人民日常生活息息相關，梅雨的氣候尺度、綜觀尺度及中尺度氣象過程之研究與預報，長期以來普遍受到國際氣象界的重視。台灣地區5、6月梅雨季之降水與豪(大)雨，影響各行各業與國民生計，其相關氣象問題之研究一向亦受相當重視，國科會曾於1978年召開「台灣地區災變天氣研討會」，將梅雨列為台灣地區四大災變天氣之一。過去50年來，由於台灣經濟蓬勃發展，隨著經濟轉型與社會型態的轉變，

災變天氣對於各行各業造成的災害也隨之轉型，例如1980年代前梅雨季連續性降水對農業造成之嚴重災害，在1980年代已轉變為豪(大)雨對工商業、水利、交通建設等之嚴重災害。

個人過去近30年來持續對台灣與鄰近地區梅雨之相關問題研究，曾在不同時期撰文回顧不同層面的梅雨研究，在1987年台灣地區中尺度實驗(Taiwan Area Mesoscale Experiment; TAMEX)計畫實地作業完成後，應國科會之邀撰文回顧過去二、三十年來有關梅雨之基礎與應用研究成果(陳1988b)，於1990年World Scientific出版之專書撰寫台灣梅雨研究回顧

(Chen 1990)，並應邀在日本氣象學會慶祝一百一十週年紀念發行之氣象學術期刊專刊發表 TAMEX 前後台灣梅雨季中尺度現象研究回顧 (Chen 1992)，隨後亦針對台灣梅雨季之豪雨研究進行回顧與評介 (陳 1994；2000；2001)，最近則接受 World Scientific 邀請，撰寫專書章節，針對近四分之一世紀以來梅雨現象研究做回顧、評介及展望 (Chen 2004)。

因梅雨研究不僅涉及學術基礎研究與應用技術發展，且涉及層面很廣，中華民國氣象學會創會 80 週年紀念，將 93 年 9 月號「大氣科學」訂為慶祝特刊，意義重大，個人有幸應邀撰寫梅雨文章，本想做一全面性回顧，但因即將於 World Scientific 發表之文章有各層面完整回顧，因此本文僅對台灣梅雨研究之鋒面部分進行回顧與評介，範圍包括台灣地區梅雨之外的華南、華中地區 (長江流域) 之梅雨研究，回顧內容則包括梅雨季降水、梅雨鋒之氣候與結構特徵、梅雨鋒與降水、梅雨鋒生等主題。

二、梅雨季降水與梅雨鋒之氣候特徵

中國的梅雨自古以來即已中外聞名，而梅雨季持續性降水現象更為其主要特徵，宋朝詩人趙師秀的「黃梅時節家家雨，青草池塘處處蛙」是極佳的寫照。Lau *et al.* (1988) 分析中國東部地區 10 天平均降水量之時間-緯度剖面分布 (圖 1)，顯示 25°~30°N 間之季風肇始反映於 5 月第一旬開始之後的降水量突增，而 5 月至 7 月間由華南向華中北移之降水量最大主軸非常突出，這就是華南地區與長江流域梅雨季的降水。圖 2 為華南之廣州、福州 (Huang 1986) 與台灣之台中 (陳與吳 1978) 降水量季節變化分布，顯然華南與台灣地區梅雨季降水

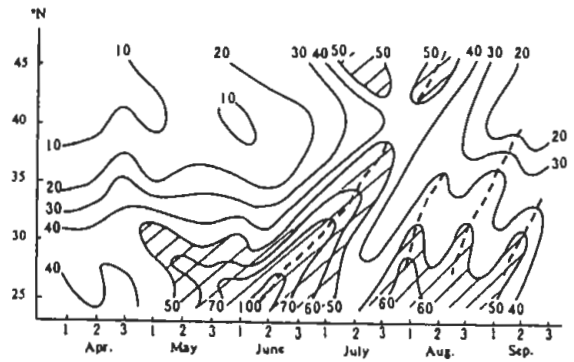


圖 1 中國東部 (100°~115°E) 10 日平均降水量之時間-緯度剖面分布。等雨量線分析間距為 10 mm (10 days)⁻¹。斜線區為降水量超過 50 mm 以上區域，粗虛線表示雨帶隨時間往北移行 (Lau *et al.* 1988)。

量呈現高峰，且集中在 5 月中至 6 月中之時段。如此，就降水量季節分布之氣候平均而言，華南與台灣地區之梅雨季出現在 5 月中至 6 月中，該期間降水量達最大值，而華中之長江流域梅雨季則出現時間較華南梅雨季 (大陸稱前汛期) 為晚，約在 6 月中至 7 月中之間。

為了解梅雨北移與西南季風隨季節之發展，Chen (2004) 分析東亞與南海地區 850 hPa 風場與渦度場長期平均 (29 年) 之時間-緯度剖面分布 (圖 3)，顯示在 5 月中至 6 月中之梅雨鋒幾乎在 30°N 以南之華南近似滯留，隨後於 6 月中至 7 月中長江流域梅雨季時梅雨鋒則移至 30°N 以北。梅雨鋒南側之西南季風由 5 月中逐漸增強，並於 6 月下旬至 7 月初期間長江流域梅雨盛行季節達到最大強度。圖 4 為華南/台灣地區與長江流域梅雨季之 850 hPa 梅雨鋒面頻率空間分布 (陳 1988a)，台灣地區梅雨季之頻率分布最大主軸，即梅雨鋒平均位置，幾呈東西走向，由日本南方海面向西延伸至華南；於長江流域梅雨季時，梅雨鋒面平均位置北移至日本地區與華中長江流域一帶。華南/台灣地

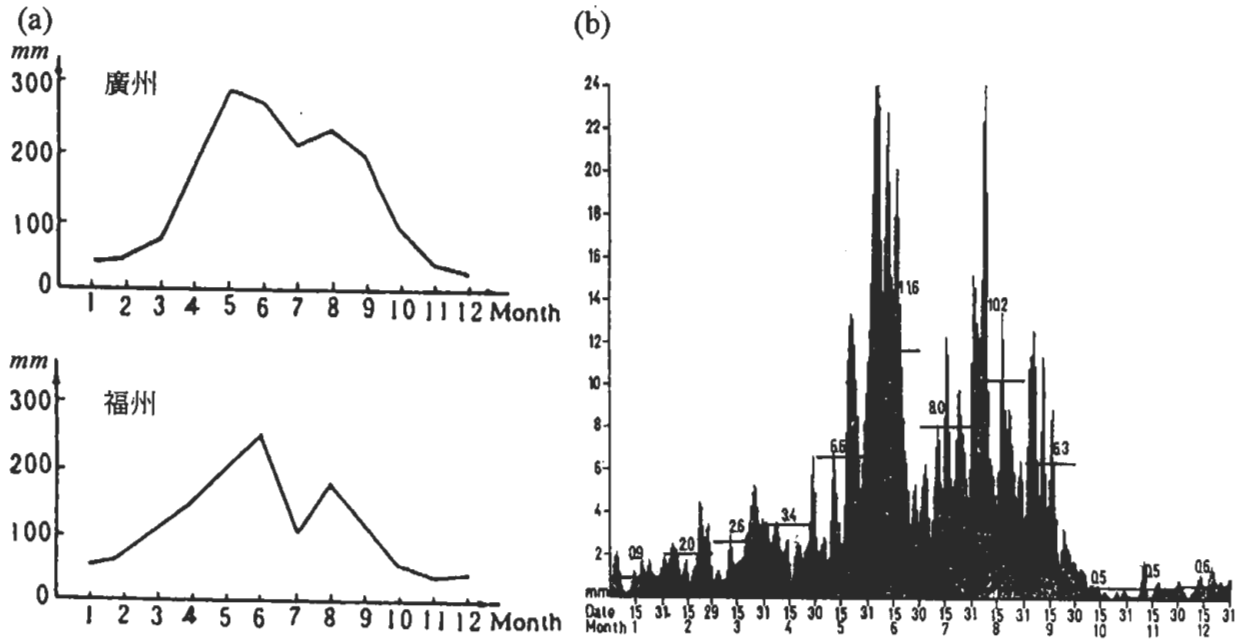


圖2 (a) 1960~1979年華南之廣州 (23°N、113°E) 與福州 (26°N、119°E) 月平均降水量 (mm) (Huang 1986) 與(b) 1951~1970年台中 (24.1°N、120.7°E) 日平均降水量 (mm) 與每月平均日降水量氣候值 (橫線; mm) (陳與吳 1978)。

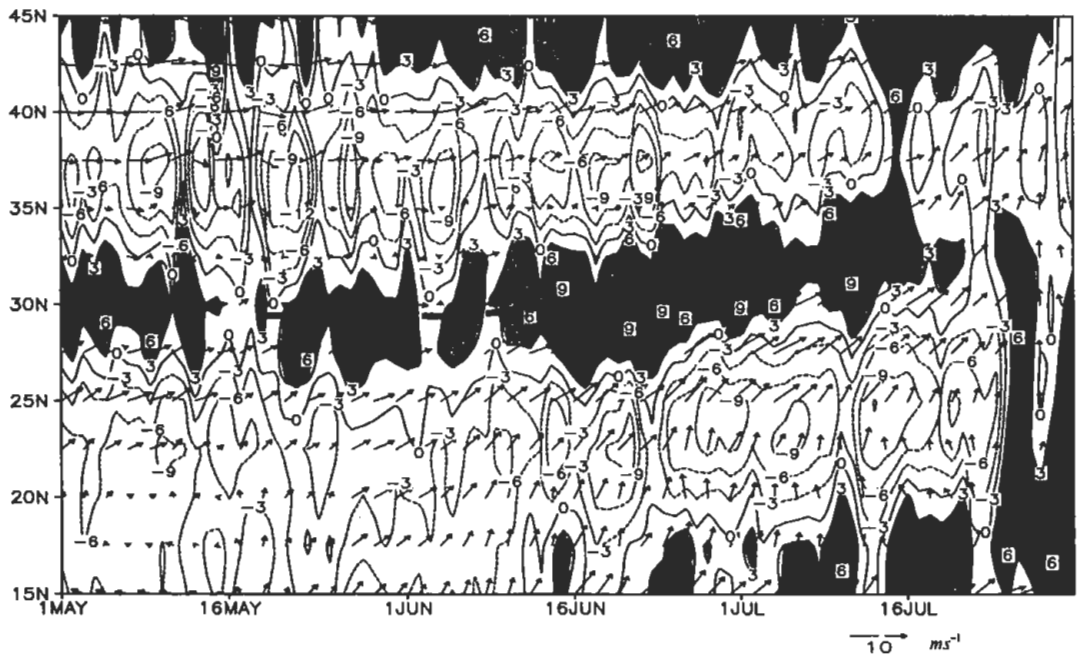


圖3 1968~1996年5月1日~7月31日東亞與南海地區117.5°~120°E間850 hPa風場與渦度場 (10⁻⁶ s⁻¹) 之時間-緯度剖面分布。粗虛線為由最大渦度主軸所定義之鋒面位置 (Chen 2004)。

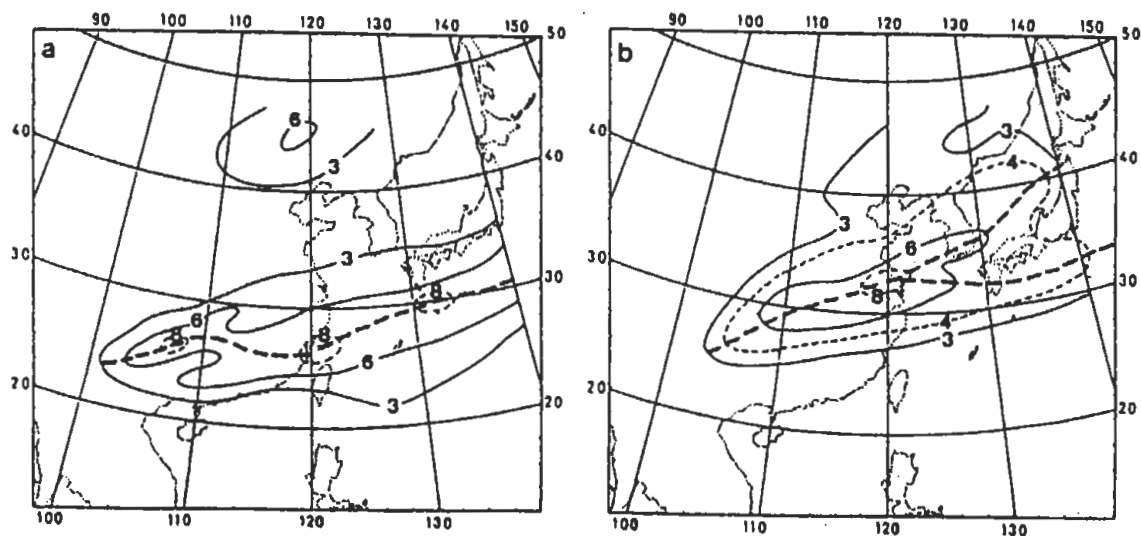


圖4 1975~1986年(a)華南與台灣地區梅雨季(5月15日~6月15日)與(b)長江流域梅雨季(6月15日~7月15日)之850 hPa鋒面年平均頻率空間分布。鋒面頻率以每12小時與 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 經緯度網格之時空解析度分析,粗虛線為頻率最大主軸(陳 1988a)。

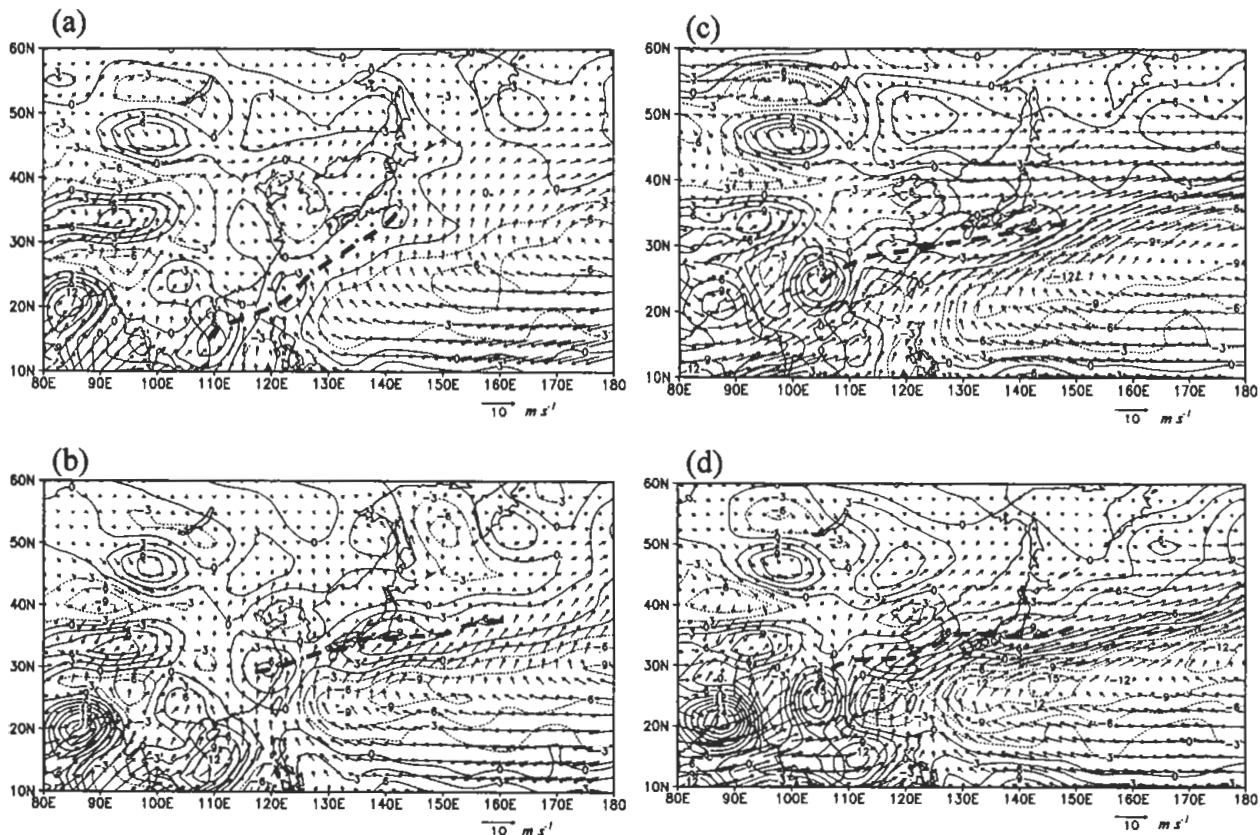


圖5 1968~1996年(a)5月16日~6月15日1000 hPa, (b)6月16日~7月15日1000 hPa, (c)5月16日~6月15日850 hPa及(d)6月16日~7月15日850 hPa之平均風場($m s^{-1}$)與平均渦度場($10^{-6} s^{-1}$)。粗虛線為由最大渦度主軸所定義之鋒面位置(Chen 2004)。

區與長江流域梅雨季之梅雨鋒生命期，均約為 8 天。

圖 5 為華南 / 台灣地區與長江流域梅雨季之 1000 與 850 hPa 平均風場與平均渦度分布 (Chen 2004)，於華南 / 台灣地區梅雨季時 850 hPa 梅雨鋒位於 1000 hPa 梅雨鋒北側，顯示梅雨系統此時屬斜壓性質。於長江流域梅雨季時梅雨鋒幾呈東西走向，且 120°E 以西區域與 1000 hPa 位置垂直傾斜較華南 / 台灣地區梅雨季時為小，顯示此時梅雨鋒面系統之斜壓性已隨季節之演進而減弱。顯然，不論在華南 / 台灣地區或長江流域梅雨季，梅雨鋒南側均有強西南季風氣流盛行。降水量季節分布於梅雨季達最大

值，主要乃因伴隨梅雨鋒面之大尺度組織性上升運動 (陳與蔡 1978) 與低對流層鋒面南側強水氣通量和鋒面區之強水氣通量輻合所致 (圖 6)。衛星雲圖常顯示，沿鋒面具有層狀雲帶並夾帶組織性強烈對流系統 (Chen and Tsay 1978; Chen 1979b)，當鋒面雲帶系統影響台灣地區時，不論在北台灣或南台灣，其伴隨之層狀雲或對流性降水寬度均約為 700 公里 (陳與紀 1978)。

Chen and Chi (1980) 分析華南 / 台灣地區梅雨季鋒生頻率之空間分布 (圖 7)，顯示有兩主要鋒生區，一為位於 40°N 以北之中緯度極鋒鋒生區，另一為位於 35°N 以南之副熱帶梅雨鋒鋒生區，圖內粗實線將極鋒與梅雨鋒形成之地理與緯度範圍做了清楚之區隔。在他們所分析發生於 40°N 以北之極鋒，皆由 30°N 以北出

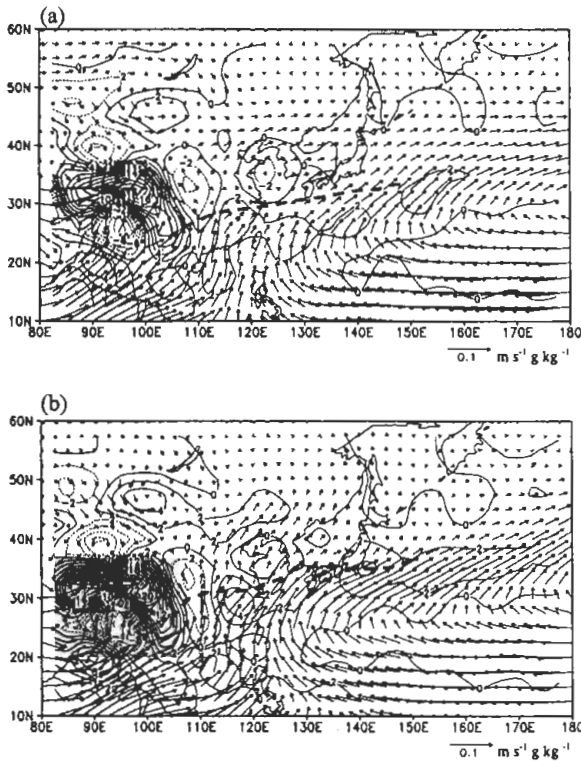


圖6 1968~1996年(a) 5月16日~6月15日與(b) 6月16日~7月15日之1000-850 hPa水氣通量(箭號為 $q\vec{v}$)與水氣通量輻合場($-\nabla \cdot q\vec{v}$, $10^{-5} \text{ s}^{-1} \text{ g kg}^{-1}$)。粗虛線為850 hPa之鋒面位置 (Chen 2004)。

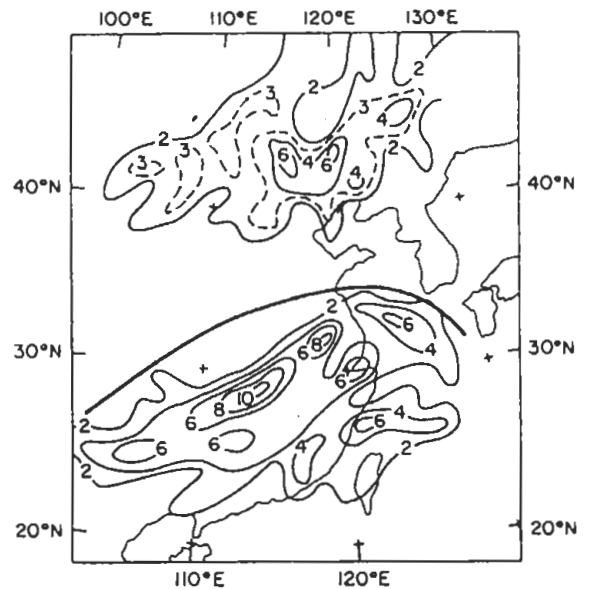


圖7 1968~1977年梅雨季(5月15日~6月15日)極鋒鋒生頻率與影響台灣地區之梅雨鋒鋒生頻率分布(以 $1^\circ \times 1^\circ$ 經緯度網格分析, 1970年與1975年缺)。粗實線為極鋒與梅雨鋒生成之分界 (Chen and Chi 1980)。

海，鋒面不影響台灣地區；而 35°N 以南之梅雨鋒面裡，有 95% 之鋒面在其生命期裡影響台灣地區，而所有抵達台灣之梅雨鋒均於 20°~35°N, 100°~130°E 區域內形成，這些梅雨鋒生命期為 3~22 天，平均為 8 天，而每年約有 4~5 道鋒面影響台灣並帶來降水(陳與紀 1978；陳與蔡 1980；陳 1988a；Chen and Chi 1980)。

三、台灣地區之梅雨鋒與降水

陳與紀(1978)以日降水量 ≥ 25 毫米之機率大於 50% 者與平均日降水量 ≥ 10 毫米者，為鋒面影響範圍之標準，發現兩種定義結果一致，北部地區為鋒後 300 公里至鋒前 400 公里，南部地區則為鋒後 200 公里至鋒前 500 公里，各地影響範圍平均均為 700 公里，此為梅雨雲帶之平均寬度(圖 8)，鋒面豪雨亦均在此範圍內發生。在鋒面降水影響範圍內，各地區之降

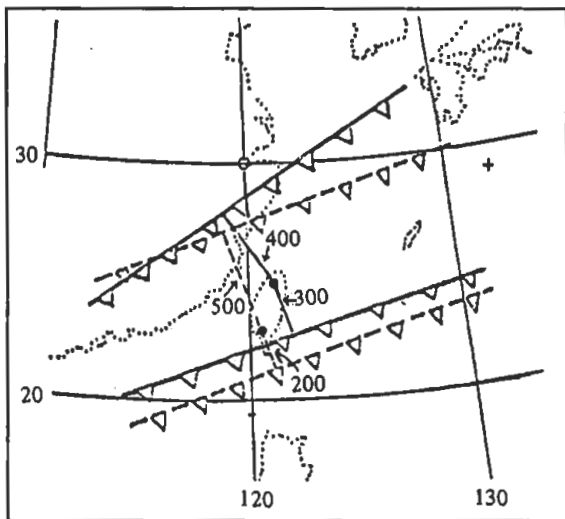


圖8 影響台灣北部(實線)與南部(虛線)降雨之鋒面系統範圍。圖內黑點表示北部與南部之代表位置數字為鋒面至此位置之距離(km)(陳與紀 1978)。

雨強度變化與鋒面之過境更是息息相關。以鋒面過境台灣中北部地區為例，前後各 24 小時期間各分區(縣市)所有測站之平均降雨強度分布，如圖 9 所示。一般而言，降雨強度於鋒前 5~8 小時開始明顯增強，並於鋒面過境時或過境後 3 小時內達最大值或相對最大值。這種降雨分布特徵除顯示梅雨季鋒面之重要角色外，其強度變化趨勢常可用於定量降水預報參考。此外，降雨強度有雙高峰現象，可能因梅雨鋒移經台灣地區時出現滯留或北退現象而來。鋒面過境中南部地區之降雨強度變化分布亦有類似中北部之性質(圖 10)，於鋒面過境時與過境後降雨強度較強，且有雙高峰現象。

豪雨個案的中尺度對流系統之結構與演變，廣泛引起學者們研究的興趣(例如：Lin/PL *et al.* 1989；Lin/YJ *et al.* 1990、1992、1993；Wang/TCC *et al.* 1990；Chen/CS 1991；Chen/CS *et al.* 1991；Tao *et al.* 1991；Jou and Deng 1992；Chen/SJ *et al.* 1998；Chen/SJ *et al.* 2000)，梅雨鋒面對於對流的影響，不僅在提供有利對流發展之環境條件，也提供中尺度強迫機制以激發對流(吳與陳 1987；陳 1988b；陳與俞 1990；Chen/C *et al.* 1998；Chen/SJ *et al.* 1998；Chen/SJ *et al.* 2000；Li *et al.* 1997)，但是鋒面在決定豪雨形成前之確切角色，目前仍是未解的課題(Chen 2004)。梅雨鋒面系統與豪雨之密切關連，顯現於 850 與 700 hPa 上之風切/槽線，圖 11 為 1965~1984 年 5~6 月台灣北部 35 個豪雨個案，於豪雨發生前 36 小時至發生後 24 小時之槽線頻率最大主軸分布(陳與吳 1985)。顯見其由華南向東南偏移影響台灣地區之特徵，而豪雨發生在槽線移近台灣北部之時，在台灣鄰近地區軸線成東西走向，反映該區梅雨鋒面系統較呈東西走向之性質。

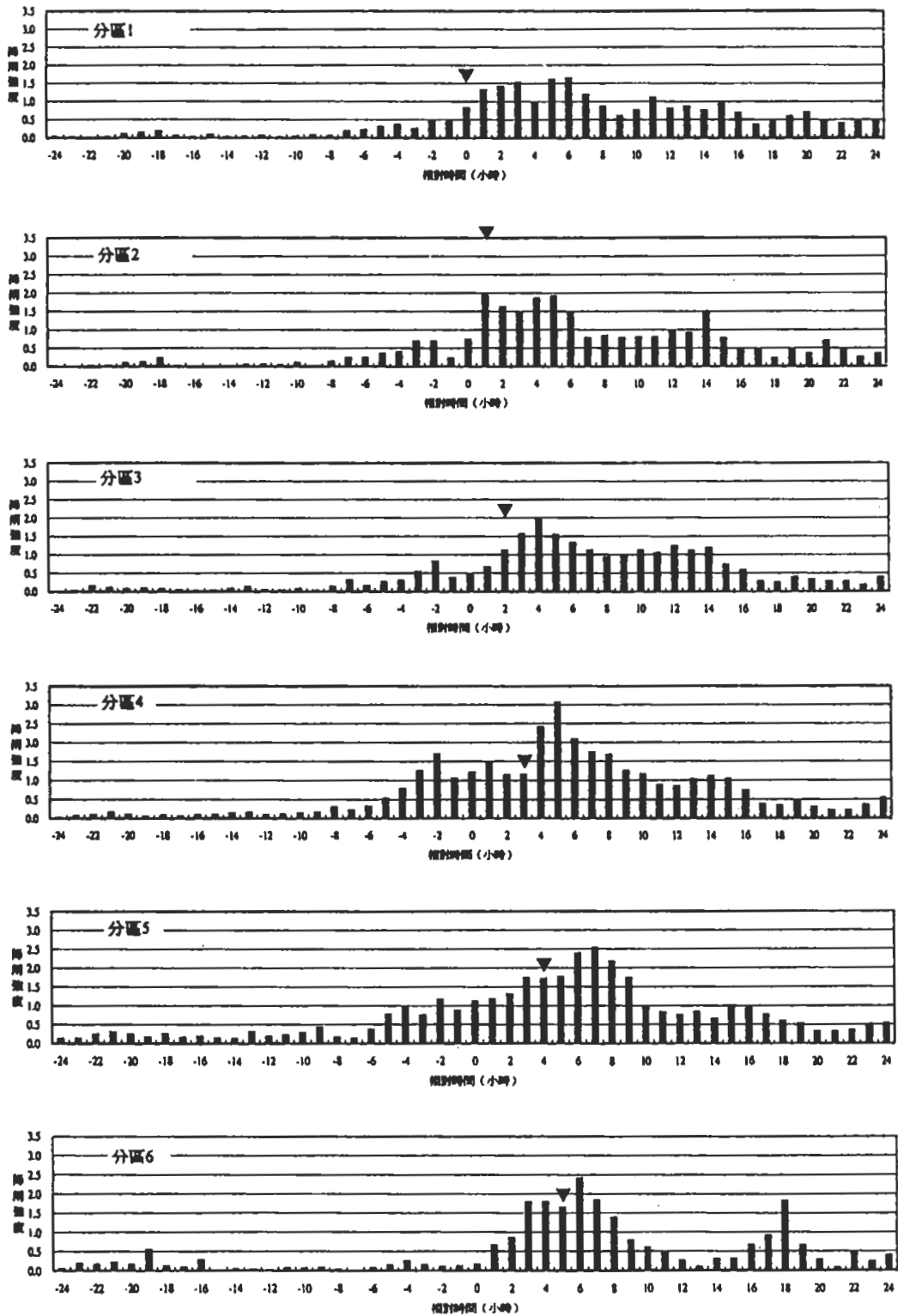


圖9 1991~1996年5~6月鋒面過境台灣中北部於前(負)後(正)各24小時內,分區內各測站之逐時降雨強度(毫米)。分區1~6分別為台北縣市(含基隆市)、桃園縣、新竹縣市、苗栗縣、台中縣市以及彰化縣,圖中「▼」所指為估計鋒面過境該區之時刻(陳與張 2001)。

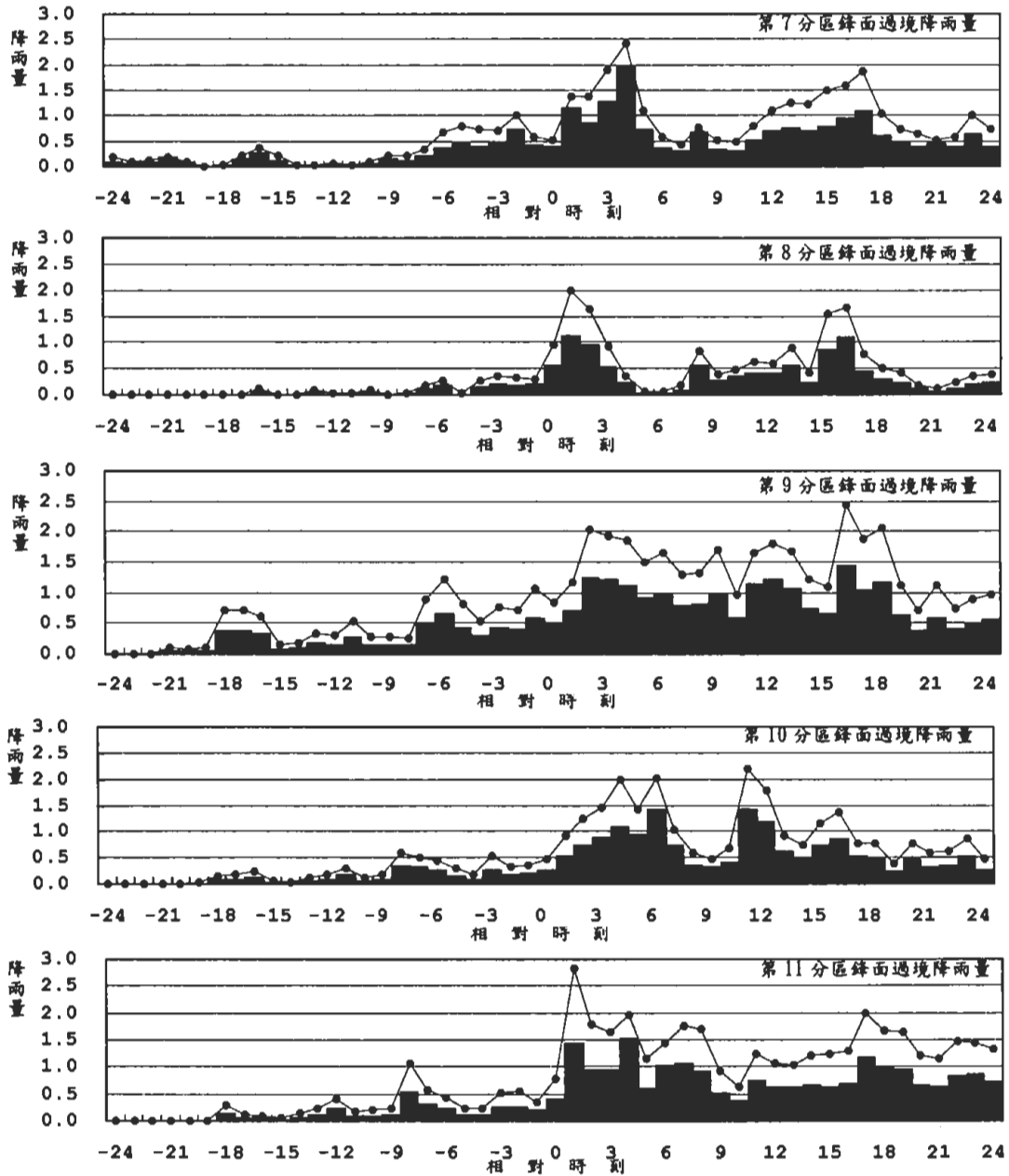


圖10 1991~1996年5~6月鋒面過境台灣中南部於前(負)後(正)各24小時內,分區內各測站之逐時降雨強度(毫米;長條)與降雨量前1/2測站之平均降雨量(毫米;折線)。分區7~11分別為南投縣、雲林縣、嘉義縣市、台南縣市以及高雄縣市(陳與張 2000)。

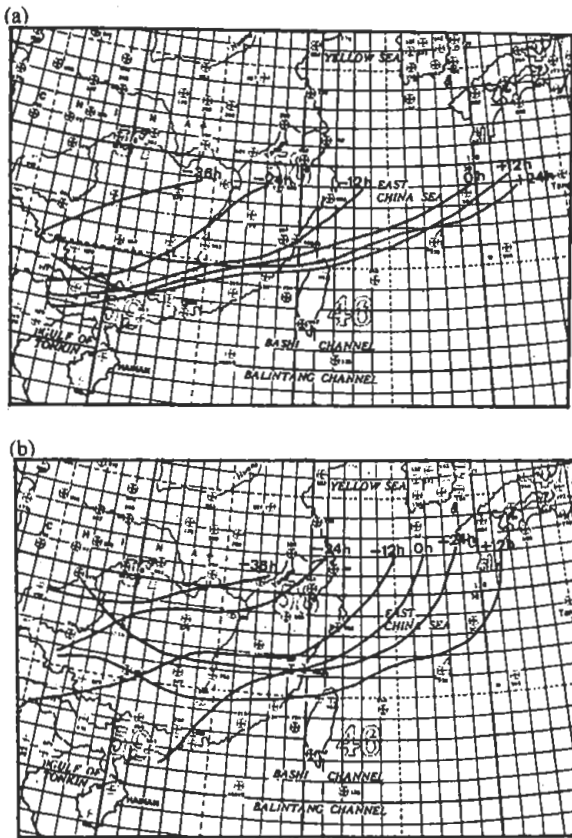


圖11 1965~1984年5~6月台灣北部35個豪雨個案，發生豪雨前36小時(-36 h)至後24小時(+24 h)之(a) 850 hPa與(b) 700 hPa短波槽頻率最大之主軸分布(陳與吳 1985)。

以台灣中北部地區為例，鋒面過境前後豪(大)雨發生之氣候機率如圖 12 所示(陳與王 2002)，顯見各分區鋒面過境時均有較多出現豪(大)雨機會，但分區 4(苗栗縣)與分區五(台中縣市)特別有利於豪(大)雨發生，主要應為該兩地區有較多之山區地形提供額外舉升所致，而過境前有較他區為大之豪(大)雨發生機率，則顯示鋒前西南氣流之增強與海峽對流系統移入該區亦均與該區豪(大)雨發生有密切關連。此外，各分區亦有類似降雨強度雙高峰之分布型態。

四、梅雨鋒之結構特徵

Chen and Tsay (1978) 與 Chen (1983) 分析 1975 年 6 月中旬一個梅雨鋒面系統之結構特徵，發現鋒面與鄰近地區低層具有大尺度強烈氣旋式渦度、水平輻合、上升運動及豐富水氣。陳與蔡 (1978) 對該個案進行中尺度分析，發現在梅雨鋒上有中尺度系統生成，大約 200~300 公里，鋒生速率為 $1.5 \sim 2^{\circ}\text{C} (100 \text{ km})^{-1} (3 \text{ h})^{-1}$ 。Chen and Chang (1980) 亦對該個案之梅雨鋒面系統東段(日本地區)與西段(華南地區)之結構與動力進行研究，結果發現西段性質較似熱帶系統、較淺、溫度梯度較弱、暖心且無垂直傾斜現象。東段則較似中緯度斜壓系統，具較強之溫度梯度、冷心系統垂直傾斜於整個對流層。圖 13 為橫跨各段鋒面之垂直速度與溫度距平垂直剖面分布，顯見橫跨各段鋒面之熱力直接環流均極顯著。他們並發現，低對流層正渦度之減弱，於東段主要導因於積雲對流向上傳送，西段主要導因於陸地與山脈之較大摩擦以及次網格系統之非線性交互作用。觀測診斷分析研究(Chen and Chang 1980; Tsay and Chen 1980; Chen/YL *et al.* 1994)與數值模擬研究(Kuo and Anthes 1982; Chou *et al.* 1990; Chen/C *et al.* 1998)均顯示，潛熱釋放在維持梅雨鋒面環流上有重要角色。

Chen/YL *et al.* (1989) 與 Chen/YL and Hui (1990) 分別分析 TAMEX IOP-4 與 IOP-9 梅雨鋒面個案，發現影響台灣地區之梅雨鋒面結構特徵有另一型態，即鋒面具有強斜壓性而不似 Chen and Chang (1980) 的個案屬溫度梯度較弱之鋒面。圖 14 為 IOP-4 梅雨鋒之垂直結構，顯見有顯著垂直傾斜(斜率 $\sim 1/150$)，且 500 hPa

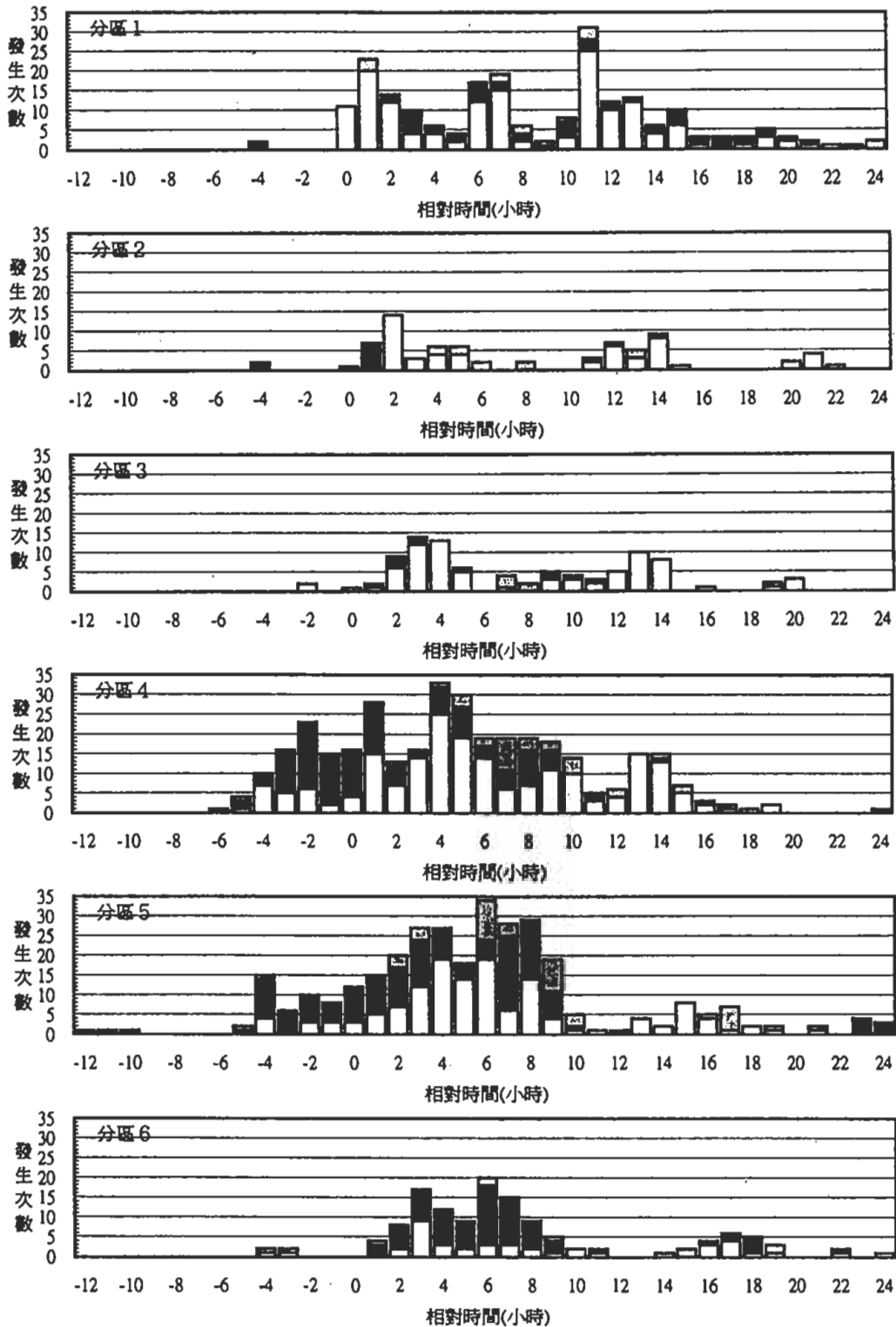


圖12 1991~1996年5~6月鋒面過境台灣中北部於過境前12小時(-12)至後24小時(+24)內,各分區出現各型豪(大)雨次數。黑色為 $\geq 130 \text{ mm (24 h}^{-1}\text{)}$;白色為 $\geq 50 \text{ mm (12 h}^{-1}\text{)}$,但 $< 130 \text{ mm (24 h}^{-1}\text{)}$ 以及灰色為 $\geq 50 \text{ mm (24 h}^{-1}\text{)}$,但 $< 130 \text{ mm (24 h}^{-1}\text{)}$ 。分區1~6分別為台北縣市(含基隆市)、桃園縣、新竹縣市、苗栗縣、台中縣市以及彰化縣(陳與王 2002)。

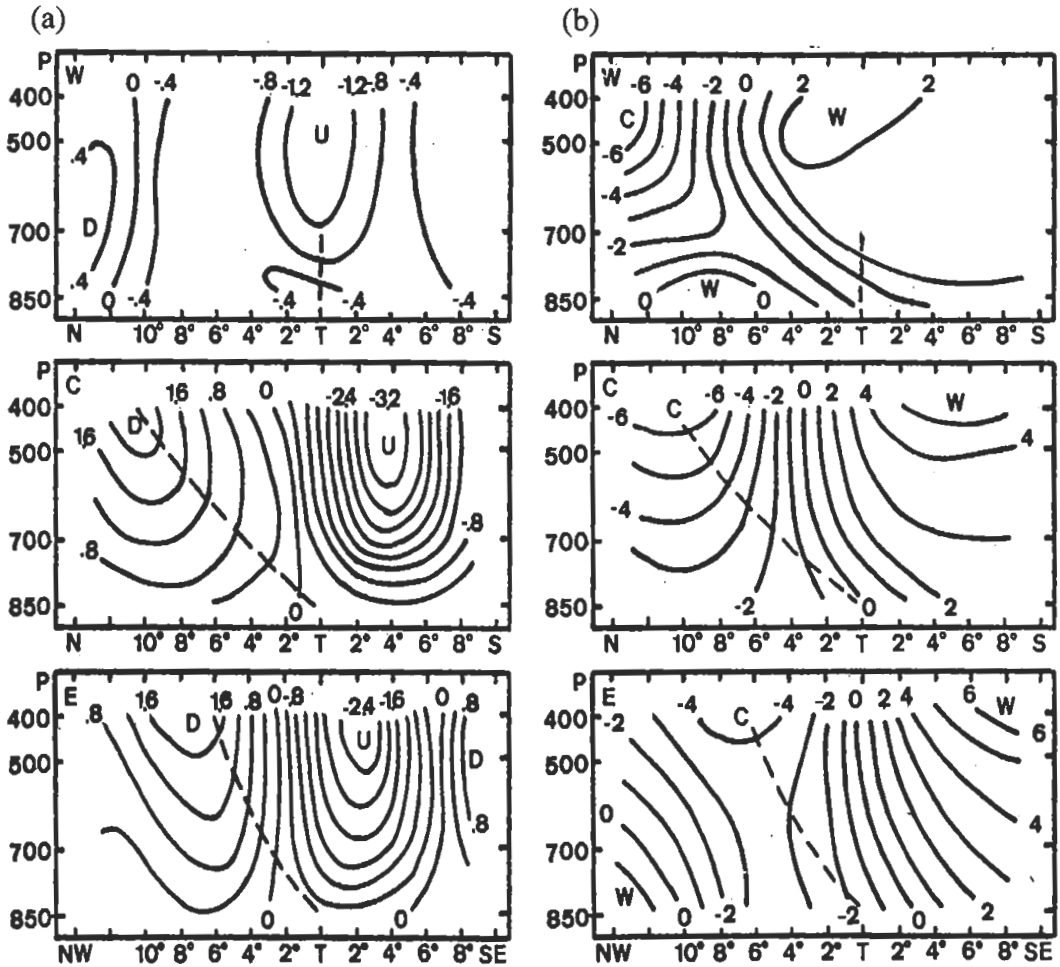


圖13 橫跨梅雨鋒面之西段(W)、中段(C)及東段(E)之(a)垂直速度($\mu b s^{-1}$)與(b)溫度距平(T' , $^{\circ}C$)垂直剖面分布。虛線為梅雨鋒，西段、中段及東段分別位於華南、東海及日本地區 (Chen and Chang 1980)。

以下之橫跨鋒面有強濕度對比、強風切及強水平相當位溫梯度。圖 15 亦顯示梅雨鋒有顯著垂直傾斜 (斜率 $\sim 1/300$)，而伴隨鋒面之強相當位溫梯度深及整個對流層，500 hPa 以下之風切與濕度對比亦強。

為了解梅雨鋒在降水所扮演之確切角色，除了大尺度鋒面區之水平輻合與暖氣團上滑於冷氣團之上的機械式鋒面舉升之外，橫跨鋒面垂直次環流之存在與結構特徵，一直是鋒面結

構裡重要的研究主題。早期因傳統觀測資料時空解析度的限制，陳與紀 (1978) 曾利用單站探空資料，假定鋒面移動方向之垂直剖面散度可由二維風場觀測值求得，並假定平行於鋒面之方向無速度輻散 / 輻合。他們經由資料合成分析發現，梅雨鋒在北台灣與南台灣均有兩個垂直次環流，分別位於鋒前與鋒後 (圖 16)，鋒後者即為橫跨鋒面之垂直次環流，在北台灣為熱力直接式，而南台灣則為熱力間接式，意味

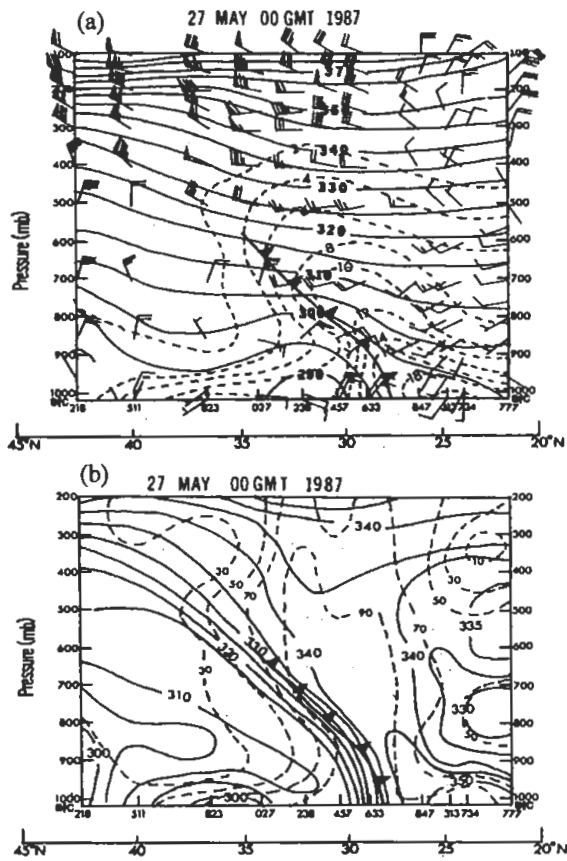


圖14 1987年5月27日0000 UTC沿118°E之(a)位溫(實線, 間距 5 K)、混和比(虛線, 間距 2 g kg⁻¹)以及風場(三角風羽、全風羽以及半風羽分別為25、5及2.5 m s⁻¹)與(b)相當位溫(實線, 間距 5 K)、相對濕度(虛線, 間距 20%)之垂直-經向剖面分布, 梅雨鋒面以傳統冷鋒符號表示(Chen/YL *et al.* 1989)。

在北台灣時仍有鋒生效應, 而在南台灣時已在鋒消階段。此外, 北台灣與南台灣在梅雨鋒前各有一與橫跨鋒面相似但反向之熱力次環流。他們發現對流活動在這些次環流上升處被加強, 在下降處被抑制, 南台灣鋒面南側之熱力間接環流可能由對流作用牽引帶動而來。在TAMEX IOP-5 鋒面個案(Chen/YL *et al.* 1994)裡的垂直次環流(圖 17)與陳與紀(1978)北

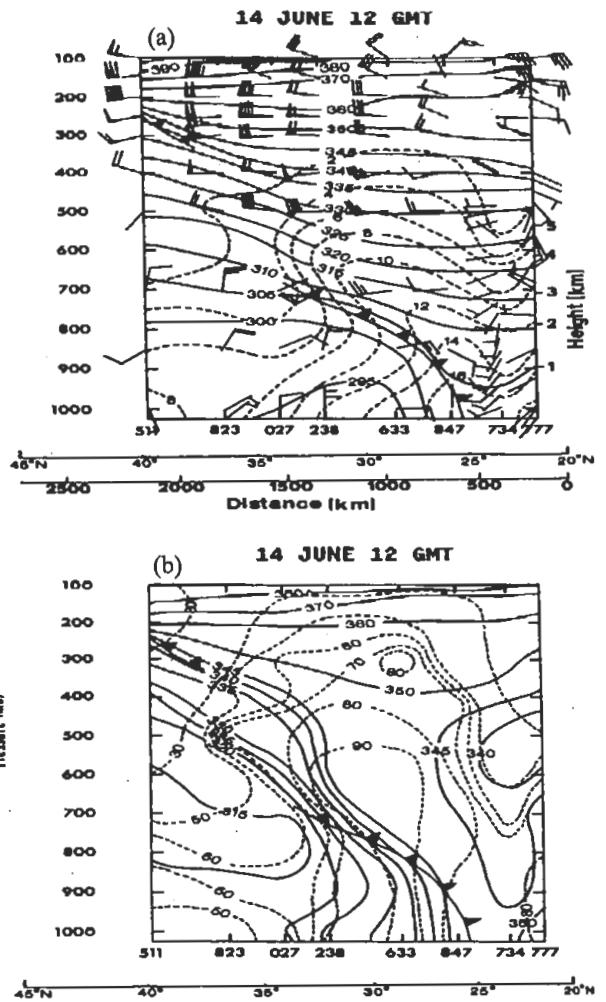


圖15 1987年6月14日1200 UTC沿120°E附近之(a)位溫(實線, 間距 5 K)、混和比(虛線, 間距 2 g kg⁻¹)以及風場(三角風羽、全風羽以及半風羽分別為25、5及2.5 m s⁻¹)與(b)相當位溫(實線, 間距 5 K)、相對濕度(虛線, 間距 20%)之垂直-經向剖面分布, 梅雨鋒面以傳統冷鋒符號表示(Chen/YL and Hui 1990)。

台灣之兩個次環流形式相似, 且鋒面南側垂直次環流亦可能由對流活動所驅動。在Chen/C *et al.* (1998)對1991年6月21~25日梅雨鋒系統的數值模擬研究裡(圖 18), 發現高層噴流的存在亦有助於橫跨梅雨鋒熱力直接環流的發展,

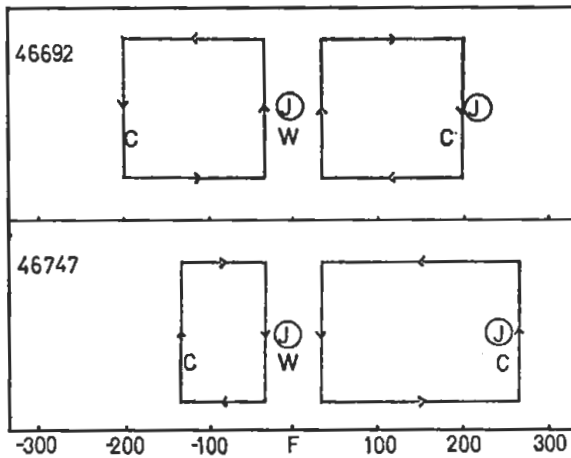


圖16 橫跨梅雨鋒面之垂直次環流。箭頭指氣流方向，J表示低層最大風速帶，C表冷空氣，W表暖空氣。X軸上F表鋒面位置，負值表鋒後公里數。上圖表示鋒面在北部時(46692)，下圖則為在南部時(46747)之環流型式(陳與紀 1978)。

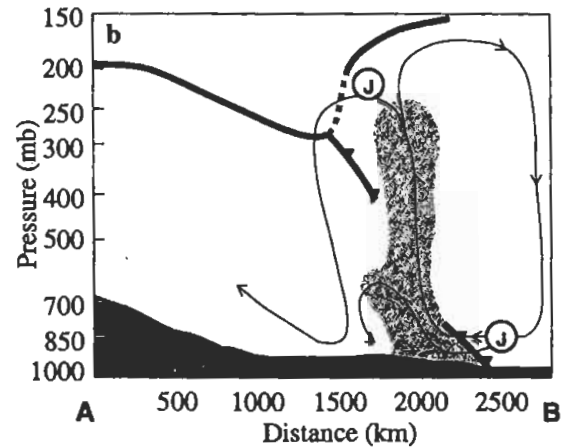
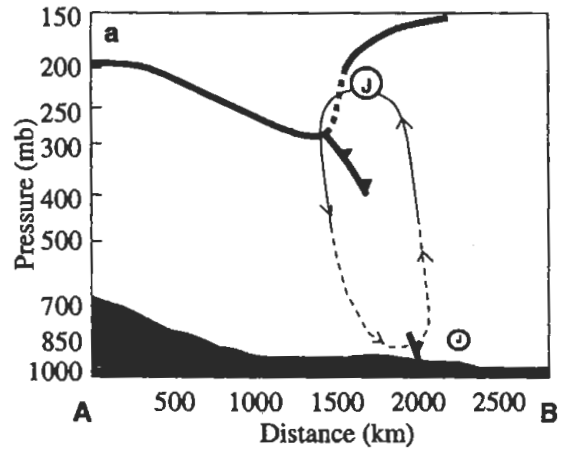


圖18 (a)高層噴流與(b)垂直和傾斜對流在低層噴流發展所扮演角色示意圖。鋒面位置以傳統冷鋒符號表示，J為噴流位置，符號大小表示噴流強度，粗實線為對流層頂折疊，細實線為強環流，細虛線為弱環流，陰影區則為雲區，黑影區為地形高度(Chen/C et al. 1998)。

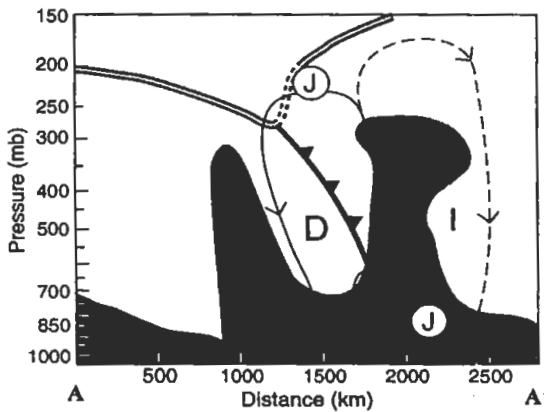


圖17 橫跨梅雨鋒面之垂直次環流分布。細實線表示強熱力直接環流(D)，細虛線表示弱熱力間接環流(I)，梅雨鋒面以傳統冷鋒符號表示，J則為高、低層噴流之位置，雙實線為對流層頂折疊位置，陰影區表示相對濕度超過70%，黑影區為地形高度(Chen/YL et al. 1994)。

而鋒面對流(垂直與傾斜)則為引發鋒面南側次環流之機制。雖然在鋒面南側低層噴流(LLJ)

形成機制解釋上，Chen/YL et al.(1994)與 Chen/C et al.(1998)對涉及之確切過程有不同看法(Chen/YL and Tseng 2000)，但顯然均認為梅雨鋒南側 LLJ 形成與 Chou et al.(1990)所得二維鋒面模式模擬研究結果相同，均可由對流所引發之垂直次環流而來，亦與陳與紀(1978)對流與垂直次環流相關連之研究結果一致。

橫跨梅雨鋒面之熱力直接環流，亦在 1987 年 TAMEX 實地作業 P-3 氣象飛機與都卜勒雷達直接觀測資料分析獲得證實（周等 1990；Chen/YL and Hui 1990；Trier *et al.* 1990；Hor *et al.* 1998）。圖 19 為 IOP-9 P-3 飛機於台灣東方海上橫跨梅雨鋒所觀測到的次環流（Chen/YL and Hui 1990），垂直剖面上之渦旋環流具有最低層由後向前之相對氣流，並在鋒前緣處上升，且有上層由前向後之迴流，於鋒後下沉，鋒面後之冷空氣前緣有類似密度流性質。此渦旋環流並具類似波動形式（wavelike pattern），且上升氣流亦呈飽和狀態，顯示上升氣流至少有一部分為潛熱釋放所具有之浮力所驅動。Li *et al.* (1997) 利用 CAA 都卜勒風場資料分析 TAMEX IOP-13 橫跨梅雨鋒面次環流，結果如圖 20 所示。鋒面前緣位於 CAA 雷達北方約 25 公里處，相關氣流與上述東側 IOP-9 橫跨鋒面之渦旋環流相似，此個案之強回波 (≥ 40 dBZ) 出現在緊鄰之鋒

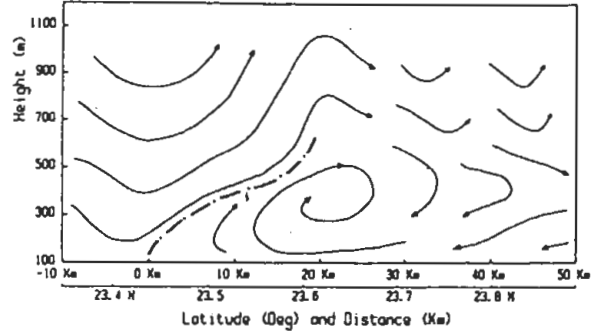


圖19 1987年6月15日1139~1407 UTC (TAMEX IOP-9) 由P-3飛機觀測求取之橫跨台灣東部海上梅雨鋒面南北向剖面相對氣流分布。風向量已減去鋒面移速(估計為 6 ms^{-1})，點虛線表示冷空氣前緣 (Chen / YL and Hui 1990)。

後 3 公里以下，回波頂 (~ 10 dBZ) 甚淺僅達 6 公里高度。Trier *et al.* (1990) 對 TAMEX IOP-8 之分析 (圖 21)，亦發現回波頂甚淺僅達 7~8 公里，且梅雨鋒之冷空氣很淺僅約 1 公里，其強斜壓性質與淺冷空氣厚度之結構與密度流性質相似。Parsons *et al.* (1989) 認為與發生在中

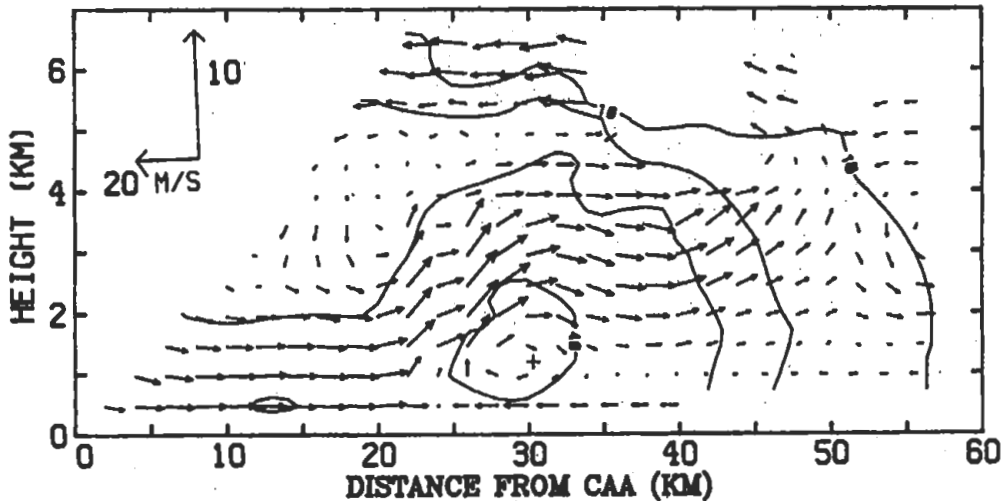


圖20 1987年6月25日0220 LST (IOP-13) 民航局中正機場都卜勒雷達回波強度(等值線間距 10 dBZ) 與相對於系統徑向風場 (m s^{-1}) 於橫跨梅雨鋒之南北垂直剖面分布。橫軸為離雷達站之北方距離 (km) (Li *et al.* 1997)。

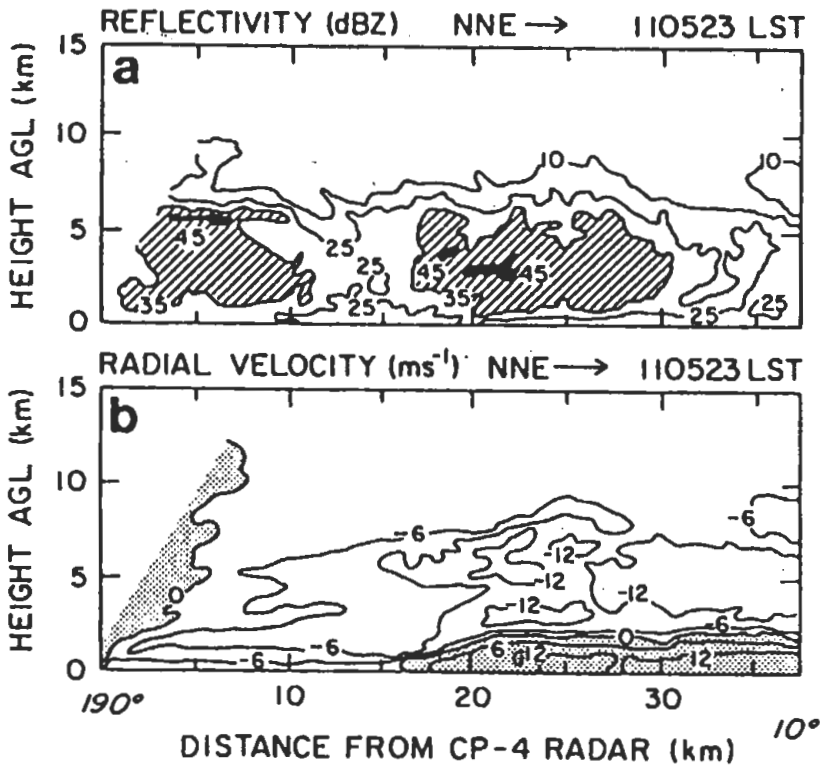


圖21 1987年6月8日1108 LST (TAMEX IOP-8) 由NCAR CP-4所觀測到之(a) RHI回波值(方位角為 10° , 斜線區為回波強度超過30 dBZ, 陰影區為超過45 dBZ)與(b)徑向風速度之北北東/南南西剖面分布(陰影區為移近雷達站之方向, 即北北東風)(Trier *et al.* 1990)。

緯度的對流系統上衝流比較, 在 TAMEX 觀測到的對流系統較小、較淺, 可能部分乃由於梅雨鋒較淺且移速較慢而來的較小低層輻合所致。當梅雨鋒南移至台灣地區時, 可能因海氣交互作用而移速減緩(Chen and Chi 1980) 並減弱(Chen/YL *et al.* 1989)。Trier *et al.* (1990) 對 TAMEX IOP-8 之鋒面分析發現, 鋒面南移橫跨鋒面溫度對比減小, 乃因鋒後可感熱上傳使近地層變暖變厚而來。

當梅雨鋒移近台灣地區時, 另一有趣現象為鋒面受地形影響而改變。中尺度分析顯示, 當梅雨鋒由北往南移動時, 因有中央山脈地形作用使鋒面分裂成東西兩段, 即東側與西側之鋒面(陳 1978; Chen 1979a), 東側部分常較

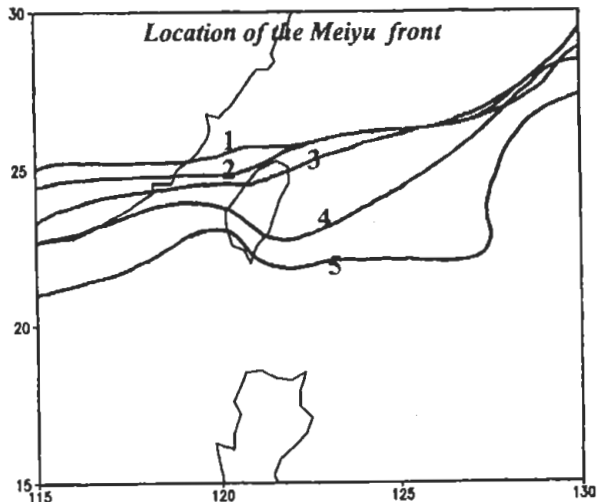


圖22 2000年6月10日0000 UTC (1)、11日0000 UTC (2)、11日1200 UTC (3)、12日0000 UTC (4) 以及12日1200 UTC (5) 之梅雨鋒面位置(Yeh *et al.* 2002)。

西側部分移速為快(陳 1978; Wang/ST 1986), 此種鋒面變形與東西兩側鋒面不同移速之現象, 在 TAMEX 期間亦極普遍(Chen/YL *et al.* 1989; Trier *et al.* 1990; Wang/ST 1989), Mannouji and Kurihara (1990) 利用 JMA 波譜模式對 TAMEX 個案之模擬, 也顯示地形為兩側鋒面移速不同之主因。Yeh *et al.* (2002) 利用 QuikSCAT 海上風場資料, 亦有與之前研究相同之結果, 即梅雨鋒於台灣東側向南移速較西側為快(圖 22), 此種東側鋒面向南加速現象之產生機制,

可能類似北美阿帕拉契山迎風面冷空氣堆積 (cold air damming) 效應(Bell and Bosart 1988; Forbes *et al.* 1987)。

五、梅雨鋒生過程

Chen and Chang (1980) 研究華南地區梅雨鋒面之結構與動力過程, 由其分析成熟與消散階段之對流活動、渦度及散度之分布與消長推論, 認為在弱斜壓性之梅雨鋒裡, 積雲對流潛熱釋放可能透過 CISK 機制與熱力直接環流

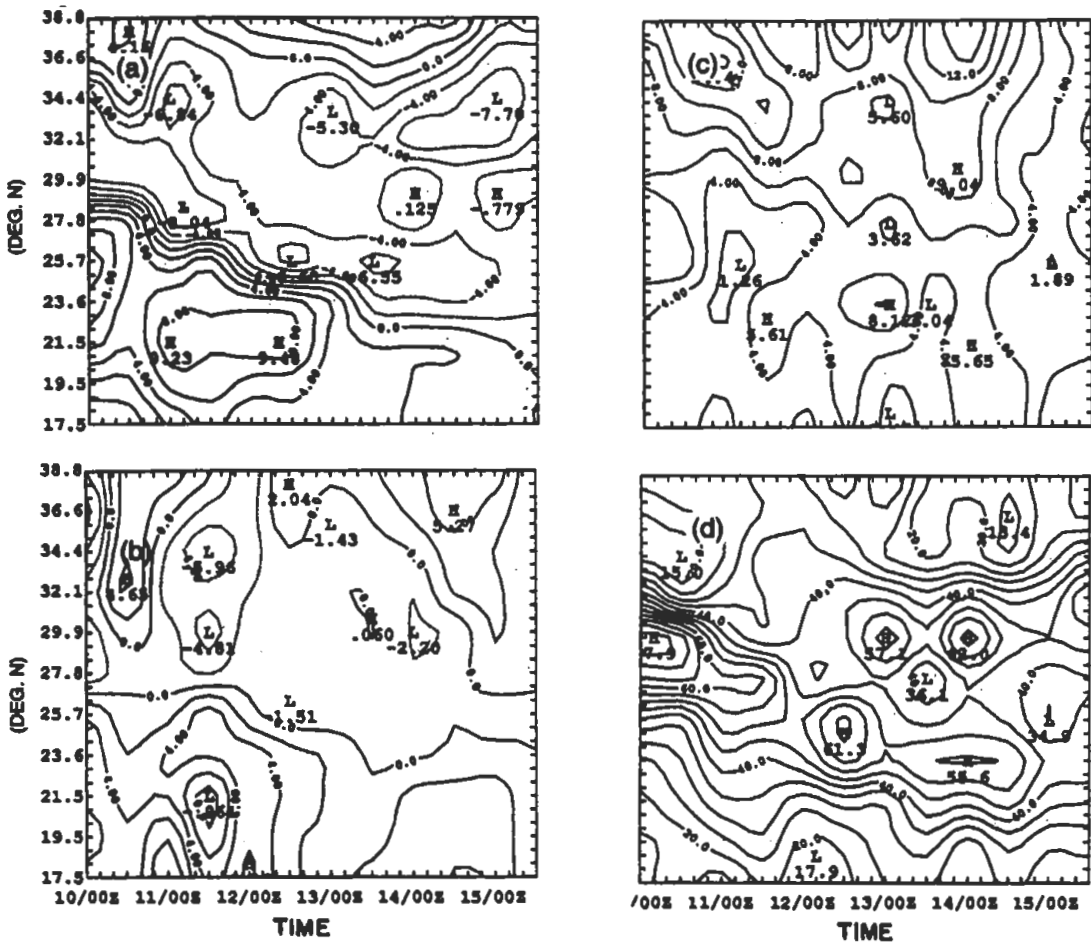


圖23 1975年6月10日0000 UTC~15日1200 UTC沿西段梅雨鋒(Chen and Chang 1980)之850 hPa (a) 東西風分量(間距 2 m s^{-1}), (b)南北風分量(間距 2 m s^{-1}), (c)溫度梯度(間距 $2 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C m}^{-1}$) 及(d)位渦場(間距 $5 \times 10^{-2} \text{ PVU}$) 時間-緯度剖面分布(Cho and Chen 1995)。

產生交互作用以維持鋒面強度。對僅具較弱斜壓性，但具較強水平氣旋式風切、較強相對渦度及較強位渦之梅雨鋒而言（圖 23，Cho and Chen 1995），這種非絕熱效應之鋒生過程與大尺度風場變形效應之鋒生過程，在梅雨鋒強度的增強與維持到底扮演何種角色，是近年來梅雨鋒動力研究的一項重要課題。Cho and Chen

（1994、1995）的理論研究發現，具低層正位渦距平之華南地區梅雨鋒之鋒生過程，係透過位渦距平與由艾克曼抽吸引發之對流間交互作

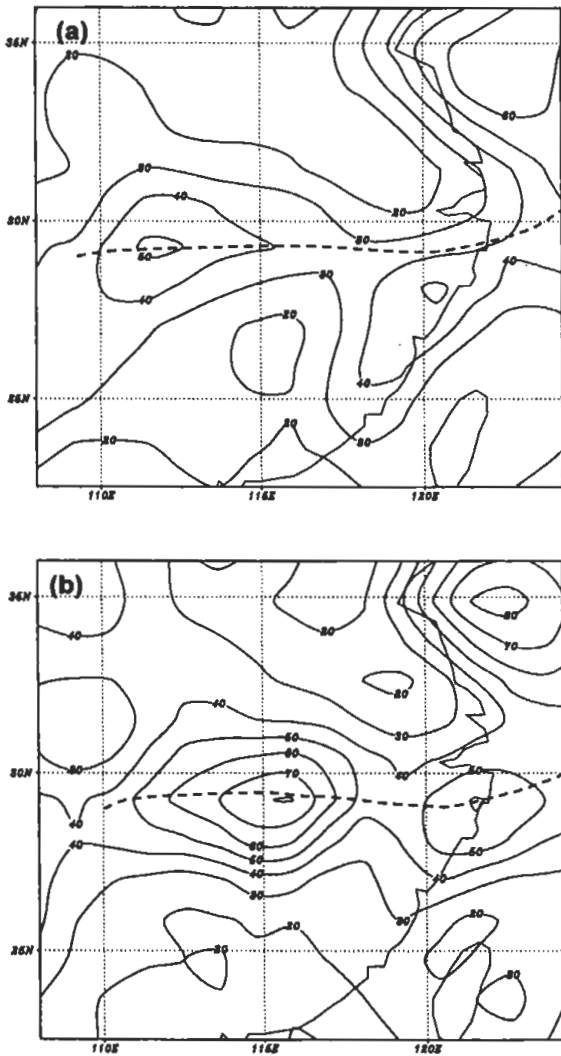


圖24 1990年6月(a)12日1200 UTC與(b)13日0000 UTC之850 hPa位渦場 (10^{-2} PVU)，分析間距 10^{-1} PVU ($1 \text{ PVU} = 10^{-6} \text{ K m}^2 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-1}$)，虛線為鋒面位置 (Chen et al. 2003)。

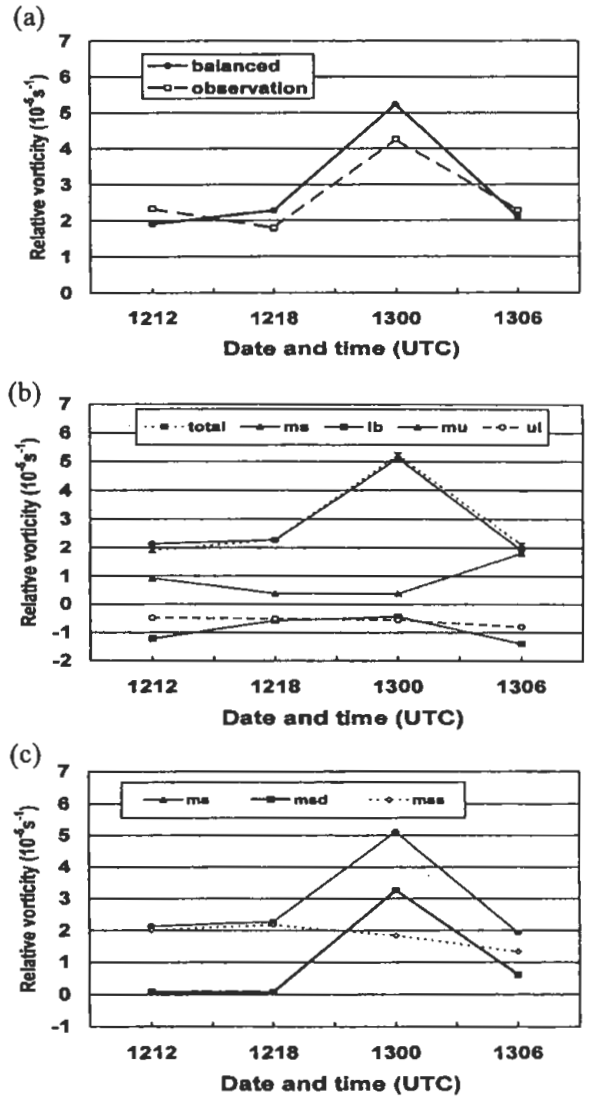


圖25 850 hPa於鋒面區之空間平均 ($29.25^{\circ} \sim 30.375^{\circ} \text{N}$ 、 $109.125^{\circ} \sim 117^{\circ} \text{E}$) 相對渦度 (ζ) 時間變化。(a)由ECMWF資料分析與經位渦反演所得之總 ζ ，(b)總 ζ 與分別來自高層 (ul)、中層潛熱釋放 (ms)、中層非潛熱釋放 (mu) 及邊界層 (lb) 過程之貢獻以及(c)在 ms 貢獻中分別由深對流 (msd) 與層雲 (mss) 所貢獻之部分 (Chen et al. 2003)。

用之 CISK 機制來引發與維持。由對流引發的輻合氣流產生尺度收縮，提供基本鋒生強迫機制。這種對流潛熱加熱在梅雨鋒生之關鍵角色，隨後亦經由個案模式模擬 (Chen/SJ *et al.* 1998) 與位渦診斷分析 (Chen *et al.* 2003) 獲得支持。圖 24 為 Chen *et al.* (2003) 所探討 1990 年 6 月 12~13 日長江流域梅雨鋒面個案 850 hPa 位渦分布，顯見鋒生現象反映在位渦之增強。經由片段位渦反演分析 (圖 25)，發現此種鋒面增強乃由積雲對流與層狀雲之潛熱釋放而來，而在主要鋒生階段則幾乎均由深對流透過 Cho and Chen (1995) 所提 CISK 之機制而來。

六、總結與建議

近年來國內氣象界對梅雨研究的重點，雖由綜觀尺度系統漸轉向中尺度系統與中尺度過程，但是梅雨之降水因牽涉各種尺度環流系統與不同尺度間交互作用，故目前仍是基礎研究、應用研究及技術研發的主要課題，特別是對流降水與豪(大)雨。梅雨季之主要降水因與梅雨鋒面息息相關，故本文針對近年來華南/台灣與長江梅雨鋒面之研究做一回顧，除探討梅雨鋒之氣候特徵和其與降水之關係外，並探討鋒面之結構特徵與梅雨鋒生問題，因梅雨鋒結構與鋒生亦均與降水密切關連。

雖然在台灣地區中尺度實驗 (TAMEX) 計畫之後，梅雨研究之風氣盛行，使我們對於梅雨鋒之結構特徵增加許多了解，特別是移經台灣地區之梅雨鋒，也對於梅雨鋒生和台灣地區梅雨降水問題增加許多認識，然而目前我們對於不同類別梅雨鋒的生成、增強及消散之確切過程，不同尺度之三維梅雨鋒之結構與動力，梅雨鋒與豪(大)雨之因果關係，梅雨鋒與地

形之交互作用等，所知仍屬有限，希望藉由此文回顧，提供今後有意從事梅雨鋒與相關研究者之參考。

致 謝

感謝張智昇先生在本文稿各方面之協助，本文在國科會專案計畫 NSC 93-2111-M-002-010 支持下完成。

參考文獻

- 周仲島、洪景山及鄧秀明，1990：梅雨鋒面對流雨帶雙都卜勒雷達分析。大氣科學，18，239-264。
- 吳宗堯與陳泰然，1987：台灣地區中尺度實驗計畫。國科會防災科技研究報告 76-19 號，133 頁加附錄一至五。
- 陳正改與蔡清彥，1980：影響台灣北部地區之梅雨系統。大氣科學，7，49-58。
- 陳泰然，1978：台灣梅雨期之中幅度天氣系統分析。台灣地區災變天氣研討會論文集編，國科會，150-157。
- 陳泰然，1988a：東亞梅雨鋒面之綜觀氣候特徵研究。大氣科學，16，435-446。
- 陳泰然，1988b：台灣梅雨研究的回顧。科學發展月刊，16，239-266。
- 陳泰然，1994：台灣梅雨季之豪雨研究。大氣科學，22，455-477。
- 陳泰然，2000：台灣豪雨研究回顧與展望。科學發展月刊，28，103-106。
- 陳泰然，2001：台灣地區之災變天氣與研究。科學發展月刊，29，851-858。
- 陳泰然與王重傑，2002：梅雨季台灣中北部地區伴隨鋒面與中尺度低壓豪(大)雨與定量降水之中尺度氣候研究。大氣科學，30，61-82。
- 陳泰然與吳宗堯，1985：「劇烈區域性豪雨觀測與分析實驗計畫」之先驅研究。國科會防災科技研究報告 74-25 號，108 頁。
- 陳泰然與吳清吉，1978：台灣五大城市之氣候特性分析。大氣科學，5，2，1-16。

- 陳泰然與紀水上，1978：台灣梅雨鋒面之中幅度結構。大氣科學，5，35-47。
- 陳泰然與俞家忠，1990：鋒面與中尺度低壓在豪雨之角色：TAMEX 第一階段之兩個個案。大氣科學，18，129-147。
- 陳泰然與張子琦，2001：台灣中北部地區梅雨季鋒面降水中尺度氣候法之預報研究。大氣科學，29，361-378。
- 陳泰然與張智昇，2000：中南部地區梅雨季鋒面降水中尺度氣候法之預報校驗。大氣科學，28，205-220。
- 陳泰然與蔡清彥，1978：台灣地區梅雨個案之中幅度系統、觀測誤差與平衡 ω 值之分析。台大大氣科學系研究報告 Mei-Yu-002，44 頁。
- Bell, G. D. and L. F. Bosart, 1988: Appalachian cold-air damming. *Mon. Wea. Rev.*, **116**, 137-161.
- Chen, C., W.-K. Tao, P.-L. Lin, G. S. Lai, S.-F. Tseng, and T.-C. C. Wang, 1998: The intensification of the low-level jet during the development of mesoscale convective systems on a Mei-Yu front. *Mon. Wea. Rev.*, **126**, 349-371.
- Chen, C.-S., 1991: A numerical study of a squall line over Taiwan Strait during TAMEX IOP 2. *Mon. Wea. Rev.*, **119**, 2677-2698.
- Chen, C.-S., W.-S. Chen, and Z. Deng, 1991: A study of mountain-generated precipitated systems in northern Taiwan during TAMEX IOP 8. *Mon. Wea. Rev.*, **119**, 2574-2607.
- Chen, G. T.-J., 1979a: Mesoscale analyses for a Mei-Yu case over Taiwan. *Papers Meteor. Res.*, **2**, 63-74.
- Chen, G. T.-J., 1979b: On the moisture budget of a Mei-Yu system in southeastern Asia. *Proc. Natl. Sci. Council.*, **3**, 1, 24-32.
- Chen, G. T.-J., 1983: Observational aspects of the Mei-Yu phenomena in subtropical China. *J. Meteor. Soc. Japan*, **61**, 306-312.
- Chen, G. T.-J., 1990: Overview of Mei-Yu research in Taiwan. *East Asia and Western Pacific Meteorology and Climate*. P. Sham and C. P. Chang, Eds., World Scientific Publishing Co., 14-37.
- Chen, G. T.-J., 1992: Mesoscale features observed in the Taiwan Mei-Yu season. *J. Meteor. Soc. Japan*, **70**, 497-516.
- Chen, G. T.-J., 2004: Research on the phenomena of Mei-Yu during the past quarter century. World Scientific Publishing Co. (*in press*)
- Chen, G. T.-J., and C.-P. Chang, 1980: The structure and vorticity budget of an early summer monsoon trough (Mei-Yu) over southeastern China and Japan. *Mon. Wea. Rev.*, **108**, 942-953.
- Chen, G. T.-J., and S.-S. Chi, 1980: On the frequency and speed of Mei-Yu front over southern China and the adjacent areas. *Papers Meteor. Res.*, **3**, 1&2, 31-42.
- Chen, G. T.-J., and C.-Y. Tsay, 1978: A synoptic case study of Mei-Yu near Taiwan. *Papers Meteor. Res.*, **1**, 25-36.
- Chen, G. T.-J., C.-C. Wang, and S. C.-S. Liu, 2003: Potential vorticity diagnostics of a Mei-yu front case. *Mon. Wea. Rev.*, **131**, 2680-2696.
- Chen, S.-J., Y.-H. Kuo, W. Wang, Z.-Y. Tao, and B. Cui, 1998: A modeling case study of heavy rainstorms along the Mei-Yu front. *Mon. Wea. Rev.*, **126**, 2330-2351.
- Chen, S. J., W. Wang, K. H. Lau, Q. H. Zhang, and Y. S. Chung, 2000: Mesoscale convective systems along the Meiyu front in a numerical model. *Meteor. Atmos. Phys.*, **75**, 149-160.
- Chen, Y.-L., X. A. Chen, and Y.-X. Zhang, 1994: A diagnostic study of the low-level jet during TAMEX IOP 5. *Mon. Wea. Rev.*, **122**, 2257-2284.
- Chen, Y.-L., and N. B.-F. Hui, 1990: Analysis of a shallow front during Taiwan Area Mesoscale Experiment. *Mon. Wea. Rev.*, **118**, 2649-2667.
- Chen, Y.-L., and S.-F. Tseng, 2000: Comments on "the intensification of the low-level jet during the development of mesoscale convective systems on a Mei-Yu front". *Mon. Wea. Rev.*, **128**, 495-506.

- Chen, Y.-L., Y.-X. Zhang, and N. B.-F. Hui, 1989: Analysis of a surface front during the early summer rainy season over Taiwan. *Mon. Wea. Rev.*, **117**, 909–931.
- Cho, H.-R., and G. T.-J. Chen, 1994: Convection and Mei-Yu front. *TAO*, **5**, 121–136.
- Cho, H.-R., and G. T.-J. Chen, 1995: Mei-Yu frontogenesis. *J. Atmos. Sci.*, **52**, 2109–2120.
- Chou, L. C., C.-P. Chang, and R. T. Williams, 1990: A numerical simulation of the Mei-Yu front and the associated low level jet. *Mon. Wea. Rev.*, **118**, 1408–1428.
- Forbes, G. S., R. A. Anthes, and D. W. Thomson, 1987: Synoptic and mesoscale aspects of an Appalachian ice storm associated with cold-air damming. *Mon. Wea. Rev.*, **115**, 564–591.
- Hor, T.-H., M.-H. Chang, and B. J.-D. Jou, 1998: Mesoscale structure of air flow in a Mei-Yu front leading edge observed by aircraft off the east coast of Taiwan during TAMEX IOP 9. *J. Meteor. Soc. Japan*, **76**, 473–496.
- Huang, S. S., 1986: *The Presummer Heavy Rainfall over South China*. Guangdong Science and Technology Press, 243 pp.
- Jou, B. J.-D., and S.-M. Deng, 1992: Structure of a low-level jet and its role in triggering and organizing moist convection over Taiwan: A TAMEX case study. *TAO*, **3**, 39–58.
- Kuo, Y.-H., and R. A. Anthes, 1982: Numerical simulation of a Mei-Yu system over southeastern Asia. *Papers Meteor. Res.*, **5**, 15–36.
- Lau, K.-M., G. J. Yang, and S. H. Shen, 1988: Seasonal and intraseasonal climatology of summer monsoon rainfall over East Asia. *Mon. Wea. Rev.*, **116**, 18–37.
- Li, J., Y.-L. Chen, W.-C. Lee, 1997: Analysis of a heavy rainfall event during TAMEX. *Mon. Wea. Rev.*, **125**, 1060–1082.
- Lin, P.-L., T.-C. C. Wang, and C.-C. Yeh, 1989: Doppler observational study of a long-lived rainband in TAMEX IOP-13. *Papers Meteor. Res.*, **12**, 91–119.
- Lin, Y.-J., H.-W. Chang, and R. W. Pasken, 1993: The structure of a subtropical prefrontal convective rainband. Part II: Dynamic and thermodynamic structures and momentum budgets. *Mon. Wea. Rev.*, **121**, 1671–1687.
- Lin, Y.-J., R. W. Pasken, and H.-W. Chang, 1992: The structure of a subtropical prefrontal convective rainband. Part I: Mesoscale kinematic structure determined from dual-Doppler measurements. *Mon. Wea. Rev.*, **120**, 1816–1836.
- Lin, Y.-J., T.-C. Wang, R. W. Pasken, and Z.-S. Deng, 1990: Characteristics of a subtropical squall line determined from TAMEX dual-Doppler data. Part II: Dynamic and thermodynamic structures and momentum budgets. *J. Atmos. Sci.*, **47**, 2382–2399.
- Lin, Y.-L., 1993: Orographic effects on airflow and mesoscale weather systems over Taiwan. *TAO*, **4**, 381–420.
- Mannouji, N., and K. Kurihara, 1990: A numerical experiment of TAMEX IOP#13 by the spectral limited area model of the JMA. *Proc. Workshop on TAMEX Scientific Results, NCAR*, 24–26 September, 121–126.
- Parsons, D. B., S. B. Trier, and J. B. Klemp, 1989: Numerical simulations of frontal updrafts observed in subtropical and middle latitudes. *Proc. Workshop on TAMEX Preliminary Scientific Results, Taipei*, 22–30 June, 6–13.
- Tao, W.-K., J. Simpson, and S.-T. Soong, 1991: Numerical simulation of subtropical squall line over the Taiwan Strait. *Mon. Wea. Rev.*, **119**, 2699–2723.
- Trier, S. B., D. B. Parsons, and T. J. Matejka, 1990: Observations of a subtropical cold front in a region of complex terrain. *Mon. Wea. Rev.*, **118**, 2449–2470.
- Tsay, C.-Y., and G. T.-J. Chen, 1980: Dynamic processes for vertical motion in a Mei-Yu system. *Papers Meteor. Res.*, **3**, 66–77.
- Wang, S.-T., 1986: Observational analysis of the interaction between fronts and orography in Taiwan during the late winter monsoon season. *Preprints, International Conference*

- on Monsoon and Mesoscale Meteorology*, Taipei, 4–7 November, 123–135.
- Wang, S.-T., 1989: Observational study of the orographically induced disturbances during TAMEX. *Proc. Workshop on TAMEX Preliminary Scientific Results, Taipei*, 22–30 June, 279–286.
- Wang, T.-C. C., Y.-J. Lin, R. W. Pasken, and H. Shen, 1990: Characteristics of a subtropical squall line determined from dual-Doppler data. Part I: Kinematic structure. *J. Atmos. Sci.*, **47**, 2357–2381.
- Yeh, H.-C., G. T.-J. Chen, and W. T. Liu, 2002: Kinematic characteristics of a Mei-yu front detected by the QuikSCAT oceanic winds. *Mon. Wea. Rev.*, **130**, 700–711.

A Review of Recent Research on the Mei-yu Front

George Tai-Jen Chen

Department of Atmospheric Sciences, National Taiwan University

(Manuscript received 04 February 2004 ; in final form 09 August 2004)

ABSTRACT

The recent research on the Mei-yu front over southern China / Taiwan and the Yangtze River Valley was reviewed. The significance of the Mei-yu rainfall in the seasonal distribution was illustrated. The climatological characteristics of the Mei-yu front and the Mei-yu frontal rainfall over Taiwan area were discussed. The uniqueness of the frontal structure and the associated secondary circulation were illustrated. Finally, the relation of the front and convection as well as the role of convective latent heating on the Mei-yu frontogenesis was discussed.

Key words: Mei-yu front, Vertical secondary circulation, Mei-yu frontogenesis, Mei-yu rainfall