

臺灣梅雨季後造型雨帶之個案模擬研究:

對流胞擾動氣壓之角色

邱炳魁 王重傑
國立臺灣師範大學地球科學系

摘要

2012年6月11日在梅雨鋒前強西南氣流影響下，臺灣海峽有利輻合環境於臺灣北部外海組織成東北-西南走向線狀對流系統。該對流系統於12日0200-0800LST在桃園至臺北降下超大豪雨，六小時累積最大降水量達311毫米，兩區呈現東西線狀分佈，造成沿海及都會區多處淹水損失慘重。本文即針對此典型梅雨季超大豪雨個案，分析降水事件時空背景，從分析圖的判斷我們認為後造型對流系統為導致北臺灣淹水主因。進一步我們使用日本名古屋大學研發之雲解析風暴模式(Cloud-Resolving Storm Simulator; CReSS)完整解析六一二北部水災事件，高解析度模擬結果除成功掌握本個案之鋒面位置及線狀對流發展、移行等，也合理模擬後造型對流胞發展過程，並發現舊對流胞移速減緩隨後與新胞合併之現象。

進一步探討後造型對流胞西側(上游)新胞激發原因，利用Klemp(1987)擾動氣壓分離法分別求出浮力擾動氣壓與動力擾動氣壓，浮力項由虛位溫與降水拖曳力組成；動力項由流體伸展項與風切項組成。氣壓診斷結果顯示新生胞擾動氣壓配置，與浮力項較一致。新生胞激發前的環境主要為透過浮力項中擾動虛位溫反應出潛熱釋放在底層產生相對高壓並伴隨正值浮力垂直氣壓梯度力，動力項在成熟胞底層是較顯著(相對高壓)，當氣流通過時減速進而加強更底層輻合，同時也使舊胞移速減緩並與新生胞合併，在合併的過程中垂直加速度也逐漸向西延伸使後造型對流胞持續發展。

關鍵字：CReSS、2012水災、梅雨鋒面、後造型對流、

一、前言

在臺灣梅雨時期發生的豪雨個案過去文獻豐富，在此介紹一些針對臺灣西北部地區豪雨個案相關研究。Yeh & Chen(2002)利用模式模擬分析顯示臺灣西北沿岸離岸輻合對於北臺灣降雨的重要性。結果顯示在臺灣西北沿岸位置因為受地形影響轉向成南風與盛行的西南風產生輻合帶，此由地形鋒面產生的輻合造成西北沿岸產生豪雨，但當移離地時西北海岸區域性最大降雨沒有模擬出來。所以他認為在季風期間臺灣西北沿岸，強輻合帶的形成可能是受到次綜觀尺度的(高層槽線)、地形效應與對流反饋三者結合造成，因此離岸輻合為臺灣西北沿岸產生最大降雨的重要因素。Wang et al.(2005)也針對在臺灣海峽上發生的線狀對流個案進行觀測分析與利用模式進行模擬分析，結果顯示輻合帶因為盛行的西南風(大尺度向岸氣流)與受中央山脈高聳地形阻擋影響產生的離岸氣流(offshore flow)，進一步對流激發影響西北部沿岸降雨。

而本研究個案2012年6月11日(六一二水災)北部地區受梅雨鋒面及旺盛西南氣流影響，位於福州與臺灣海峽激發移

入臺灣的雨帶，為中尺度對流組織系統(Mesoscale Convective Systems)，由其在18至00 UTC短短六小時內降下312毫米雨量，如此短暫爆發的高降水量在當時臺北及桃園等都會區帶來嚴重的水患，造成人命與經濟的損失。對流系統分類在過去已有相當多研究，Schumacher and Johnson(2004,2005,2006)將MCS大致上分成兩類型，一、線狀對流向前移動伴隨層狀降水Training Line - Adjoining Stratiform(簡稱TL/AS)。二、後造-準靜力穩定對流發展Back-Building /Quasi-Stationary(簡稱BB)，對流幾乎呈現滯留情形，主要依賴於mesoscale 和 stormscale過程，範圍較小且在上游處不斷產生新對流胞往下游移至特定方向，而下游處即將消散的對流胞逐漸被成熟的對流胞取代而產生層狀降水。透過觀測綜合進一步指出BB類型的MCS比TL/AS更難預測，短暫且迅速發展對當地帶來高降水強度，災害更勝於TL/AS。

而針對後造型線狀對流組織內部對流胞在西側不斷被加強，新生對流胞在成熟胞西側被激發出的原因，過去有兩種理論機制可以解釋。第一種為熱力反應產生的質量場的變化，Dowell et al.(1996)提出多胞對流胞模型，他認為說在對

流胞前緣下沉區，因為降水透過蒸發冷卻，在底層產生冷池，下沉氣流產生的輻散外流與後方的噴流形成陣風鋒面，如果當時對流胞後側持續顯著的噴流通過的話，容易於陣風鋒面上輻合舉升進而加強上升速度的發展，而陣風鋒面固定不動，成熟對流胞向前側移動，而新生對流胞就不斷在後側激發，造成垂直速度不斷往後側移動，造成整個對流系統帶留。第二種為動力作用改變，Johnson (2011)認為透過垂直風切分佈與擾動氣壓的相互關係，中尺度對流系統環境當中若有顯著向東的低層噴流存在，將於噴流軸的上下層產生反向的垂直風切，藉由上下層反向的風切配置，水平的氣壓梯度也會在上下層反向，造成在對流胞上風切側處(西側)的底層產生相對高壓，高層產生相對低壓，下風切處相反。而對流胞西側氣壓配置，將有利產生向上(正值)的垂直氣壓梯度力，有利加強對流胞西側的垂直速度，新生對流胞有機會在成熟胞的西側發展出來。

二、研究方法

本研究首先利用中央氣象局提供之地面與高層天氣圖，進行綜觀天氣之相關分析，並確認低層梅雨鋒面位置與高層系統配置，判斷東亞地區大氣環境有利於對流胞發展的綜觀環境。在中尺度分析方面，使用東亞地區紅外線色調強化衛星雲圖，可以提供對流雲系發展的初始時間、位置、強度及隨時間演變對流移行的情況，高時間解析的雷達回波圖可以更進一步瞭解對流細節結構。接續使用中央氣象局地面觀測站檢控對流移入臺灣地區伴隨降水的分佈，判斷降水強度及主要雨區形狀進行討論。

本文之研究個案期間發生臺灣海峽海面上的中尺度對流系統，由於海上資料缺乏，且也為了進一步探討對流尺度的雲動力過程，故使用日本名古屋大學地球水循環研究中心所發展的雲解析風暴模式(Cloud-Resolving Storm Simulator；CRSS)，空間解析度更高的CRSS 模式資料以求能看到更精細的對流過程。模式水平網格間距設定為 1.5 公里，垂直方向使用追隨地勢之高度(ζ)座標，並採用雙曲正切函數之垂直伸展網格，最小間距為 100 公尺並向上逐漸增加，平均間距為 300 公尺，垂直伸展網格點界於 100 至 980 公尺。模式網格點數為 1000 × 800，模擬範圍為西經 112.25° 至 126.5°、北緯 18.25° 至 29.0°，共 1500 × 1200，垂直方向網格點數為 50 層，總厚度為 75 公里。在模式數值計算上，水平方向使用外顯有限差分法，垂直方向則採用內隱法並以高絲消去法求解。羅士比波與基本物理參數波動使用時間積分間距(大步積分)為 2.0 秒，積分方式採用蛙跳法(Leap-frog)與 Asselin 時間濾波，聲波與重力波使用積分間距(小步積分)為 1.0 秒，水平

方向為前向-後向積分法，垂直方向則為 Crank-Nicolson 積分法。

本研究著重在於環境尚提供何種條件加強對流胞發展的動力或熱力過程，故研究進一步求取擾動氣壓。已知擾動氣壓可以分為動力作用產生的動力擾動氣壓與浮力作用產生的浮力擾動氣壓，但僅已知擾動氣壓梯度力，對於對流胞內動力項與浮力項作用無法分開探討。Klemp (1987)利用近似不可壓縮包桑方程，將擾動氣壓分離成動力項與浮力項。

浮力項可表示成：

$$\nabla^2 P'_b = \frac{\partial}{\partial z} \rho_0 B \quad \text{其中, } B \text{ 為浮力} \quad (2.1)$$

$$B = g \frac{\theta'_v}{\theta_{0v}} - g(q_r + q_i + q_s + q_g + q_c) \quad (2.2)$$

動力項可表示成：

$$\nabla^2 P'_d = -\rho_0 \left[\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 - \right.$$

$$\left. w^2 \frac{\partial^2 (\ln \rho_0)}{\partial z^2} \right] - 2\rho_0 \left(\frac{\partial v}{\partial x} \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial u}{\partial z} \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial z} \frac{\partial w}{\partial y} \right) \quad (2.3)$$

(2.1)與(2.3)分別為浮力擾動氣壓(P'_b)與動力擾動氣壓(P'_d)取拉普拉斯(Laplacian-取兩次梯度)之包桑方程。藉由右式不同作用項分別探討與擾動氣壓關係。

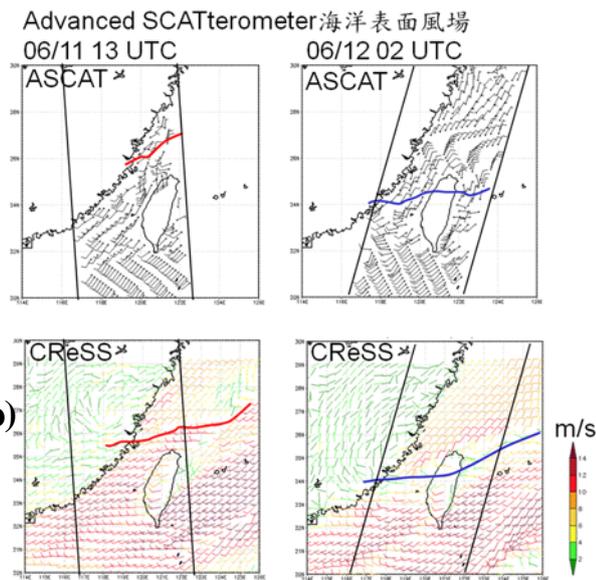
(2.1)浮力擾動氣壓取 Laplacian 結果與浮力垂直分布有關，

$\frac{\partial}{\partial z} \rho_0 \left(g \frac{\theta'_v}{\theta_{0v}} \right)$ (簡稱 pbg)、 $\frac{\partial}{\partial z} \rho_0 \left(-g(q_r + q_i + q_s + q_g + q_c) \right)$ (簡稱 pbl)，pbg 為氣態擾動浮力垂直方向分佈，由溫度與濕度對氣體密度影響產生的浮力並以擾動虛位溫表示；pbl 為固液態的降水拖曳力垂直方向分佈，由雲水、雨、雪、雲冰、雹五種降水粒子混和比的總合。(2.3)動力擾動氣壓取 Laplacian 結果主要可分為流體伸展項(fluid extension term)與流體風切項(fluid shear term)兩大項，流體伸展項包含了 $-\rho_0 \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2$ (簡稱 ex1)、 $-\rho_0 \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2$ (簡稱 ex2)、 $-\rho_0 \left(\frac{\partial w}{\partial z} \right)^2$ (簡稱 ex3)、 $+\rho_0 w^2 \frac{\partial^2 (\ln \rho_0)}{\partial z^2}$ (簡稱 ex4)，ex1、ex2 為水平輻散值平方、ex3 為垂直方向輻散值平方、ex4 垂直速度與密度垂直分布之關係。流體風切項包含了 $-2\rho_0 \left(\frac{\partial v}{\partial x} \frac{\partial u}{\partial y} \right)$ (簡稱 sh1)、 $-2\rho_0 \left(\frac{\partial u}{\partial z} \frac{\partial w}{\partial x} \right)$ (簡稱 sh2)、 $-2\rho_0 \left(\frac{\partial v}{\partial z} \frac{\partial w}{\partial y} \right)$ (簡稱 sh3)，sh1 為水平風切、sh2 為東西向垂直風切與垂直速度關係、sh3 為南

北向垂直風切與垂直速度關係。我們探討上述各項在對流胞上衝流附近的分佈，判斷激發環境主要由哪項貢獻。

三、模擬結果與分析

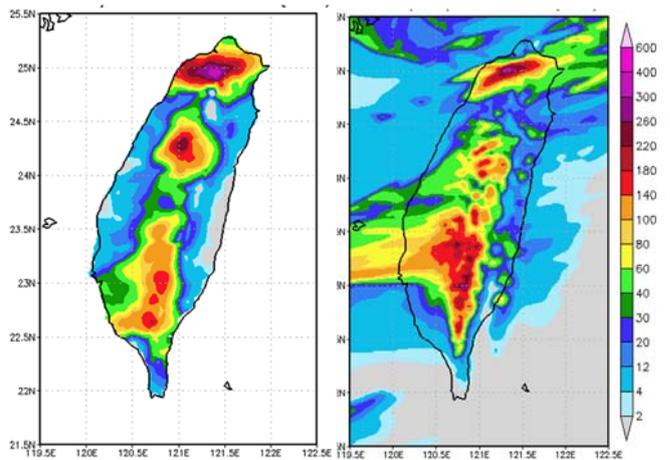
接下來本節我們將針對CReSS模式結果與不同的觀測資料進行比對校驗，確保模式結果對於鋒面的移行、降水等綜觀環境有合理的掌握。圖一為利用ASCAT衛星觀測資料之海面風場資料評估模式對於梅雨鋒面掌握的程度。11日1300 UTC模擬結果其梅雨鋒面位於119°E、25.5°N附近呈現東北西南走向與ASCAT衛星觀測資料所定的鋒面位置一致，鋒前與鋒後環境的風向及風速相似。12日0200 UTC模式輕易可見梅雨鋒面落在臺灣中部地區向西延伸至臺灣海峽(藍線處)，與ASCAT梅雨鋒面位置相似。圖二為累積降水分布圖，結果顯示1800至0000 UTC兩區分佈與強度，模擬降水分佈中與南的兩區最大值集中在山區，顯然是受到地形效應的影響，北部地區降水呈現東西線狀分布且集中在沿海及都會區，與南部降水類型截然不同，兩區分佈與地面實際觀測資料一致。我們認為模式在此段強降水期間成功掌握南北不同降水機制，顯示結果之合理具有參考價值。



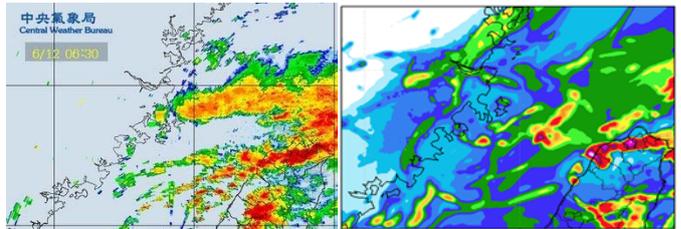
圖一 六月11日12 UTC至12日00 UTC個案期間之近地面風場(風標, kt)與風速值分布(色階, m/s)，紅與藍線為梅雨鋒面位置。(a)ASCAT (b)CReSS結果。

圖二 2012年六月11日18 UTC至12日00 UTC累積雨量(毫米)。(a)中央氣象局雨量觀測站 (b)CReSS結果

透過雷達回波與模式結果顯示於圖三，強降水期間由線狀對流主導北部降水事件，CReSS結果線狀對流行移位置與演變都有很好的模擬表現，對流胞呈現東北西南方向並往西南偏西方向移動，主要的強回波區落於臺北及桃園都會區。



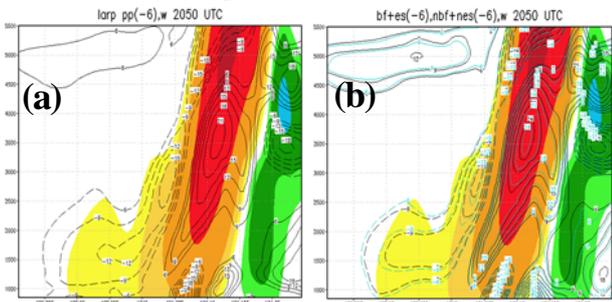
圖三 六月11日2230 UTC之降水粒子分佈圖，(a)中央氣象局雷達迴波合成圖，單位dBZ (b) CReSS模擬結果之雨、雪與雹垂直方向最大值，單位g/kg。



圖四 個案期間後造型對流胞垂直速度時序圖(色階, m/s)，箭頭表示新生對流胞。

四、對流胞擾動氣壓分析

我們首先將(5.1)與(5.3)右手項的總合求出的浮力與動力擾動氣壓取 Laplacian 再相加(即 $\nabla^2 P'_b + \nabla^2 P'_d$)與使用模式輸出之擾動氣壓取 Laplacian(即 $\nabla^2 P'$)進行比較,如圖五顯示,

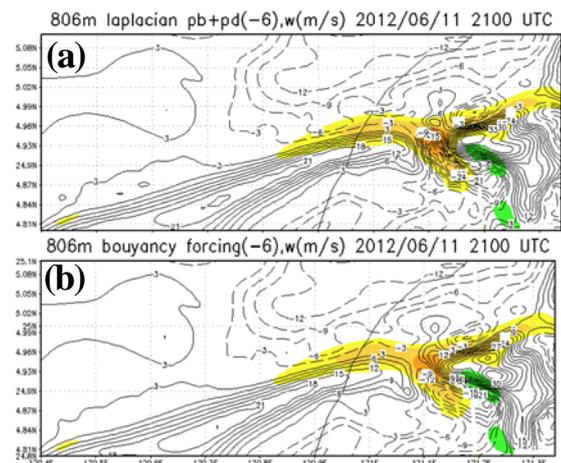


可觀察到兩種不同方法求得的擾動氣壓取 Laplacian 分佈幾乎無差異,表示由模式資料透過 Klemp(1987)擾動氣壓分離法計算過程中合理。

圖五 20時30分 UTC 對流胞東西兩側剖面垂直速度(色階, m/s)、(a)扣除背景場獲得的擾動氣壓取 Laplacian (b)黑色等值線為 Klemp 分離法求出的 $\nabla^2 P'_b + \nabla^2 P'_d$ 、藍線等值線為使用鬆弛法去求出的 $\nabla^2(P'_b + P'_d) \times 10^{-6} \text{Pa m}^{-2}$,正負3間距。

(一)線狀對流Laplacian分佈探討:

由底層線狀對流Laplacian擾動氣壓我們看到,浮力項與總和分佈無太大差異,表示說在整個環境中擾動氣壓主要的來源由浮力項所貢獻。在對流胞附近,上衝流最大值的西側 Laplacian浮力擾動氣壓(圖六b)對應於相對高壓;東側對應於相對低壓,當加入了Laplacian動力擾動氣壓之後(圖六a)西側負值提升兩倍;東側也小幅正值提升,顯示在低層環境中靠近流胞上衝流最大值區域的動力項可能比較顯著的影響。

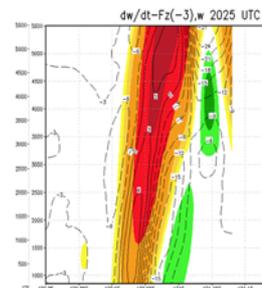


圖六 線狀對流 2100 UTC 時高度 806 公尺擾動氣壓,垂直速度(色階, m/s);等值線為(a)Laplacian 浮力與動力擾動氣壓總和($\nabla^2 P'_b + \nabla^2 P'_d$) (b)Laplacian 浮力擾動氣壓($\nabla^2 P'_b$)。

(二)對流胞Laplacian分佈探討:

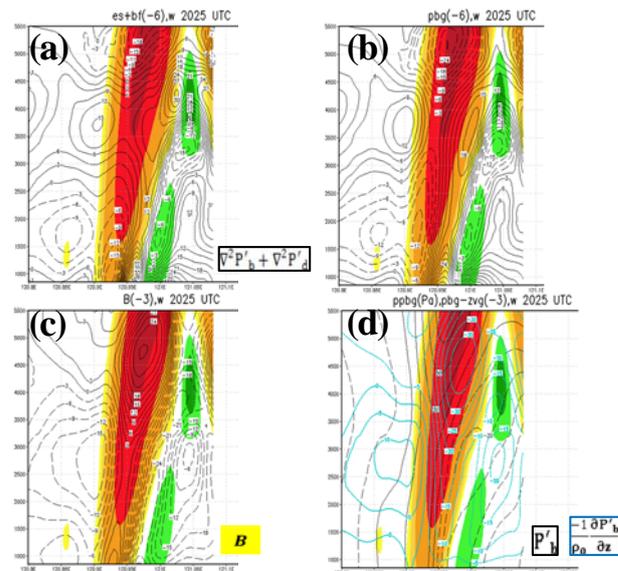
接下來我們將討論對流胞尺度範圍並利用透過通過新舊對流胞中心的東西方向垂直剖面來釐清對流胞西側被激發的原因。

圖七為2025UTC,新生對流胞尚未被激發前環境,由 $\nabla^2 P'_b + \nabla^2 P'_d$ 可以看出在對流胞的東西兩側底層呈現項對低壓與高壓;高層則是相反,同時圖七(b)為 $\nabla^2 P'_b$ 中的擾動浮力可以看出與圖七(a)一致,也就是說在對流胞激發前的環境主要由擾動虛為溫所反應出(負值貢獻),而動力項在新生胞附近貢獻不大(圖未示)。進一步透過緩和法將 $\nabla^2 P'_b$ 還原成 P'_b ,並且求取 P'_b 在垂直方向產生的氣壓梯度力,圖七(d)可以看出在新生胞附近底層高壓與高層低壓的配置產生出正值(向上)



浮力垂直向氣壓梯度力,但與圖七(c)負值(向下)擾動浮力相互抵消,所以在垂直加速度分佈只要還是集中在成熟胞底層(圖七e),新生胞附近底層也僅有微弱的輻合(圖七f)。

舊胞發展一段時間之後(2055UTC),新生對流胞於成熟胞西側發展出來(圖八 a),我們觀察到動力項作用在成熟胞附近顯著,且具有 Johnson(2011)提到在成熟胞西側高低層有相對

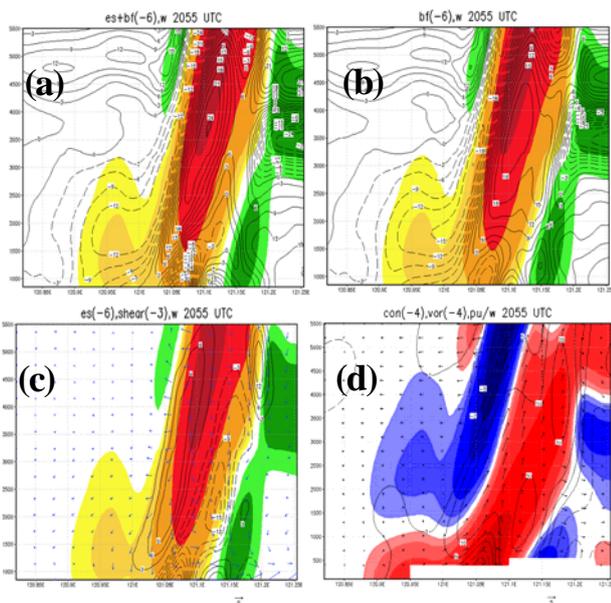


低壓與高壓分佈,比對圖八(b)來看(圖八f)發現成熟胞中底層的擾動氣壓(相對高壓)主要由動力項所貢獻出,我們認為當底層

$$\frac{dw}{dt} - Fz = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p'}{\partial z} + B$$

西南風氣流通過成熟胞底層相對高壓時，產生減速的情況有利增強底層的輻合，而驅使低壓於新生胞底層發展出來，加強新生胞結構。

圖七、BB02對流胞2025 UTC東西剖面的垂直速度色階，m/s(a) $\nabla^2 P'_b + \nabla^2 P'_d$ (b) $\nabla^2 P'_b$ 項中的氣態擾動浮力(c)擾動浮力(10^{-3} ms^{-2}) (d)黑色等值線為透過緩和法求出 P'_b (Pa) 與藍色等值線為浮力垂直向氣壓梯度力(10^{-3} ms^{-2}) (e)垂直加速度(10^{-3} ms^{-2}) (f)輻合輻散值(色階， 10^{-4} s^{-1})、相對渦度(等值線， 10^{-4} s^{-1})與二維投影風場(擾動 u 與 w 合力，m/s)。



圖八、BB02對流胞2055 UTC東西剖面的垂直速度色階，m/s(a) $\nabla^2 P'_b + \nabla^2 P'_d$ (b) $\nabla^2 P'_b$ (c) $\nabla^2 P'_d$ (d) 輻合輻散值(色階， 10^{-4} s^{-1})、相對渦度(等值線， 10^{-4} s^{-1})與二維投影風場(擾動 u 與 w 合力，m/s)。

五、小結

本研究針對2012年六一二水災，典型梅雨季超大豪雨個案，利用CReSS模式成功掌握鋒面位置合理性、東西線狀的降水分佈及線狀對流發展、移行等。也合理模擬後造型對流胞發展過程，並發現舊對流胞移速減緩隨後與新胞合併之現象，乃為造成北部地區豪大雨發生原因。進一步透過Klemp(1987)擾動氣壓分離法診斷後造型對流胞擾動氣壓來原，結果顯示環境中擾動氣壓主要的來源由浮力項所貢獻，浮力項中擾動虛位溫反應出潛熱釋放在底層產生相對高壓並伴隨正值浮力垂直氣壓梯度力，新生胞透過虛位溫的反應被強迫出來，而進一步透過動力項在成熟胞底層相對高壓的分佈，使氣流通過時產生減速，使得在底層的輻合增強，透過

增強的輻合有利新生胞底層的低壓發展，進而加強新生胞的結構。

六、未來工作

目前研究進度尚未釐清擾動虛位溫透過何種條件與機制進而讓新生胞上升速度發展，未來進度將著重在於更深入釐清後造型對流胞發展的過程。

參考文獻

- 李俊彥, 2013: 莫拉克颱風雨帶內對流胞擾動氣壓分布之探討。國立臺灣大學理學院大氣科學所碩士論文，47 頁。
- Doswell, C. A., III, H. E. Brooks, and R. A. Maddox, 1996: Flash flood forecasting: An ingredients-based methodology. *Mon. Wea. Rev.*, **11**, 560
- Klemp, J. B., 1987: Dynamics of tomadic thunderstorms. *Annu. Rev. Fluid Mech.*, **19**, 369-402.
- Parker, M. D., and R. H. Johnson, 2000: Organizational modes of midlatitude mesoscale convective systems. *Mon. Wea. Rev.*, **128**, 3413 - 3436.
- , and —, 2004: Structures and dynamics of quasi-2D mesoscale convective systems. *J. Atmos. Sci.*, **61**, 547-567.
- Rutunno, R., and J. B. Klemp, 1982: The influence of the shear-induced pressure gradient on thunderstorm motion. *Mon. Wea. Rev.*, **110**, 136-151.
- Schumacher, R. S., and R. H. Johnson, 2005: Organization and environmental properties of extreme-rain-producing mesoscale convective systems. *Mon. Wea. Rev.*, **133**, 961-976.
- , and —, 2006: Characteristics of U.S. Extreme Rain Events during 1999 - 2003. *Wea. Forecasting*, **21**, 69-85.
- Wang, C.-C., G. T.-J. Chen, T.-C. Chen, and K. Tsuboki, 2005: A numerical study on the effects of Taiwan topography on a convective line during the Mei-yu season. *Mon. Wea. Rev.*, **133**, 3217-3242.
- Yeh, H.-C., and Y.-L. Chen, 2003: Numerical simulations of the barrier jet over northwestern Taiwan during the Mei-Yu season. *Mon. Wea. Rev.*, **131**, 1396-1407.

