

# 莫拉克颱風的多重尺度背景環流

許晃雄<sup>1</sup> 洪志誠<sup>3</sup> 翁春雄<sup>1</sup> 李明營<sup>1,5</sup>  
羅資婷<sup>5</sup> 郭芮伶<sup>1</sup> 柯巨重<sup>4</sup> 周佳<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 台灣大學大氣科學系

<sup>2</sup> 中央研究院環境變遷研究中心

<sup>3</sup> 台北市立教育大學自然科學系

<sup>4</sup> 高雄師範大學地理系

<sup>5</sup> 中央氣象局長期預報課

(中華民國九十九年五月十五日收稿；中華民國九十九年六月三十日定稿)

## 摘 要

2009年8月初，莫拉克颱風和科尼與艾陶颱風幾乎同時發生於西北太平洋的大尺度季風環流圈內。此環流圈南側的西南季風環流提供充足的水氣，形成一個大範圍的對流活躍帶，其空間尺度遠大於颱風主渦旋半徑。莫拉克颱風發生期間的大氣環流具多重尺度特性，包括颱風渦旋、東南往西北移動的10-30天擾動的氣旋環流、以及南往北移動的40-50天擾動氣旋環流。在莫拉克颱風侵襲台灣期間，10-30天擾動是大尺度水氣輻合的主要來源，並在颱風南側形成大範圍對流帶，莫拉克颱風則沿此一對流帶北緣移動。由於大範圍對流帶與西南季風環流位於颱風南側，加上南部陡峭地形對西南氣流的舉升作用，颱風最強的對流出現在南側，形成偏南的不對稱對流分佈，以致於近颱風中心的台灣北部雨量不如預期的多，強對流與超大豪雨反而發生於台灣南部。

2009年7-9月，菲律賓海的雨量、水氣量與海溫均高於90百分位(即前百分之十)，屬於高度異常。季風槽偏南且偏強，台灣處於下沉區屬於偏乾旱的氣候型態，鄰近海域不利颱風生成與發展，且大多數颱風路徑偏南偏西。此一狀況顯示莫拉克颱風發生於一個乾旱的年份。此一異常氣候型態可歸因於赤道中太平洋偏暖海水引發的異常大氣環流。雖然處於偏乾的氣候型態，7月底-8月初月出現一個短暫的空檔，讓原本活躍於南菲律賓海的對流性環流透過10-30天與40-50天擾動移行至台灣附近，導致莫拉克颱風伴隨10-30天擾動挾帶豐沛水汽侵襲台灣，造成破紀錄的超大豪雨與災害。

關鍵字：莫拉克颱風(2009)、多重尺度交互作用、10-30天波動、季內振盪

## 一、前言

前人研究指出，熱帶西北太平洋颱風的生成與發展受到大尺度背景環流（如季風槽、季風環流圈、季內振盪等）調節作用的影響，2-3 個颱風同時存在或接續出現的現象經常發生。這是因為大尺度環境場提供了有利於颱風生成與發展環境：近海面的正渦度與水氣幅合、微弱的垂直風切、高對流層輻散與高海溫等。如果這樣的環境持續存在，颱風群聚效應就可能發生(Nakazawa 1986; Liebmann et al. 1994; Harr and Elsberry 1995; Chen et al. 2007; Maloney and Dickinson 2003; Camargo et al. 2007a,b)。西北太平洋的季風槽盛行的區域恰好符合這些特性，因此熱帶氣旋容易發生於其中（Gray 1978, Harr and Elsberry 1995）。季內振盪（週期短於一個季節，又比一般的天氣系統如颱風的時間尺度為長）是夏秋季期間經常出現在西北太平洋的擾動(Hsu and Weng 2001)，通常在菲律賓海由低緯度的東南方朝西北往台灣一帶移動，影響季風槽的強度與菲律賓海的對流活躍程度，因此間接影響颱風的生成與路徑(Gray 1978; Nakazawa 1986; Maloney and Dickinson 2003, Elsberry 2004, Hsu 2005)。

Ko and Hsu (2006, 2009)的最近研究發現除了季內振盪，颱風也經常藏身於 10-30 天波動的氣旋擾動中，由菲律賓海往台灣與日本間海域移動。此一颱風/10-30 天擾動又受到 30-60 天季內振盪的影響。季內振盪處於西風（亦即對流旺盛）相位時，提供正渦度與水氣豐富的有利發展環境；相反的，東風（對流偏弱）相位時則是負渦度與水氣不足，不利於颱風/10-30 天擾動的發展。這些研究顯示颱風與大尺度環流其實是一個多重時間與空間尺度的複雜系統，宛如多樣性的

大氣生態體系。要充分瞭解熱帶西北太平洋的夏季天氣與氣候變化，必須從多重尺度交互作用的方向著手。

2009 年 8 月，莫拉克颱風 (Morakot) 帶來近 50 年最大的雨量，洪災與土石流重創南台灣。莫拉克僅是一個中度颱風，風速不強，特殊之處為主要雨帶不是位於颱風主渦旋附近，而是在南方 2-3 百里之處。我們的研究發現前述的颱風/10-30 天擾動/季內振盪的多重尺度系統再度出現於莫拉克颱風個案中。亦即，莫拉克颱風存在於一個 10-30 天波狀擾動中，而此颱風/10-30 天擾動則又嵌套於季內振盪的氣旋環流之中。大尺度的 10-30 天與 40-50 天的大尺度環流場強化源自孟加拉灣的西南季風環流，將豐沛的水氣傳送至台灣鄰近地區，形成水氣幅合帶，有利於豪大雨的發生。此一有利於中尺度系統與對流發展的環境，以及台灣南部陡峭地形舉升作用，可能是莫拉克颱風在南部造成重大災害的重要氣象因素。莫拉克颱風受到導引氣流的影響，掃過大尺度環流形成的大範圍對流帶，因此位於主渦旋南方的對流反而比渦旋附近對流還強，形成主對流帶與颱風中心脫離的現象。這個因素可以解釋為何颱風中心登陸後轉向通過台灣北部，但是最大雨區卻發生在南部。本文除了探討此一有利於莫拉克颱風發展的多重尺度背景場，也從 2009 年颱風季（7-9 月）熱帶西太平洋的整體環流與類聖嬰現象的海洋特性，探討莫拉克颱風的特殊性。

## 二、颱風的大尺度背景場

一般而言，大多數颱風降雨都發生於颱風渦旋之中，亦即主要雨區多發生於於颱風主渦旋附近。莫拉克颱風卻相當不同。圖 1 中的颱風路徑與 TRMM 累積雨量分佈，顯示主要的雨區發生

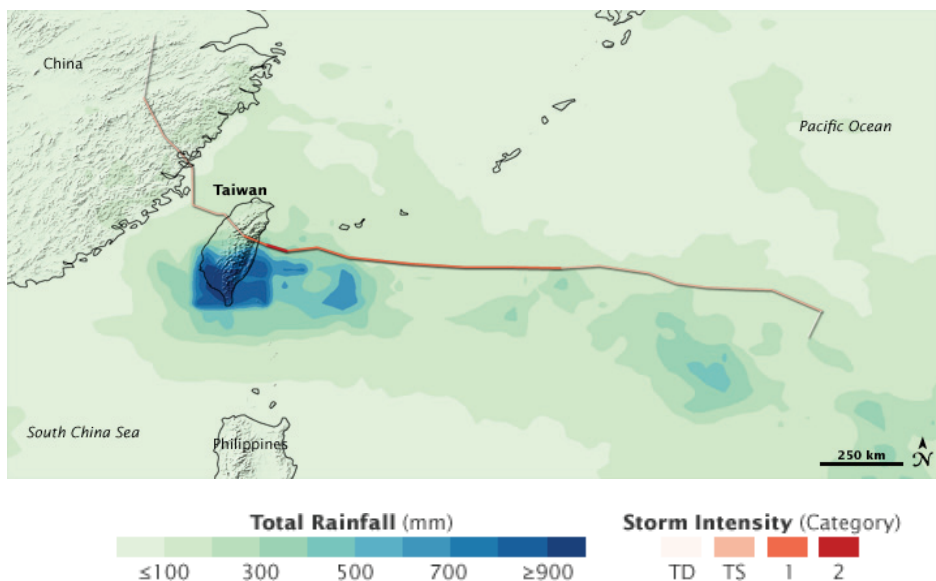


圖 1 TRMM 觀測的 8/5-8/9 累積雨量 (圖片來源：NASA)

於颱風路徑南方數百公里之處，與一般情況大異其趣。此一偏南的不對稱特徵在台灣附近最明顯，這一方面是因為颱風在接近台灣的過程中逐漸變強，另一方面可能是因為颱風接近台灣時，環流受到台灣地形抬升的影響，對流加強，雨量變大。但是值得注意的是，這個不對稱的偏南特徵早在莫拉克颱風生成時與在到達台灣之前就存在，顯示除了颱風環流之外，另有其他大尺度環流的影響。

吾人也可以從紅外線衛星雲圖清楚觀察到這個特殊的現象。圖 2 顯示 8/8 0200Z 時，颱風中心位於台灣西北部，強對流卻發生於台灣南部，颱風中心附近對流反而不強。此一現象與降雨分佈（南部超大豪雨，北部雨量不大）一致。在同一時間，另有一強對流帶發生於台灣東南方海面上，而且尺度更大。更有趣的是，此時西北太平洋 20°N 附近，從南海北部，往東延伸至北菲律賓海，同時存在三個颱風：莫拉克颱風的東西方各有一個颱風，西方為科尼颱風(Goni)，東方是

艾陶颱風(Etau)。

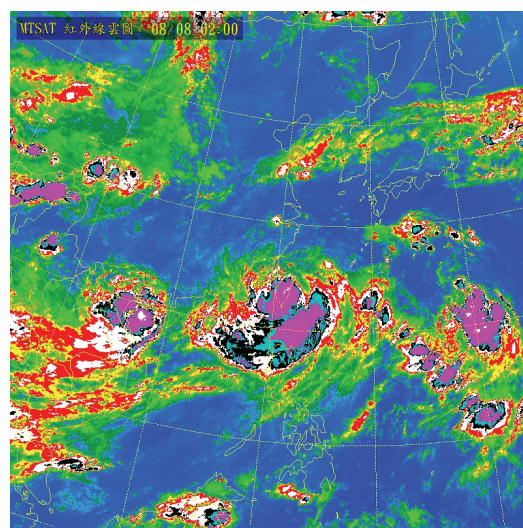


圖 2 8/8 0200Z 紅外線色調強化雲圖 (圖片來源：中央氣象局)

分析 CloudSat 資料可以進一步判斷對流強度與發展高度。圖 3(右)是 CloudSat 衛星在 8/7 05:25:58 到 05:29:09 期間經過台灣上空時取得的反射率 (reflectivity) 資料，涵蓋的範圍為 17.1°N-28.6°N 與 120.2°E-122.9°E。圖中顯示台灣南部的

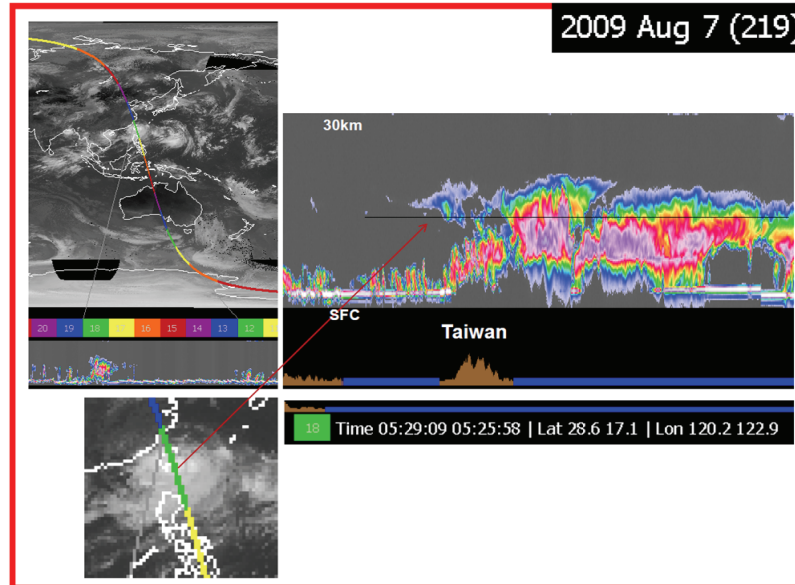


圖3 2009年8月7日 ClouSat 軌道、雲圖與沿軌道的反射率垂直剖面（圖片來源：NASA）

對流發展高度幾乎高達 20 公里，顯現當時的對流相當劇烈。圖 3 也顯示在此一深對流帶的南方，還有另外一個水平尺度更大的深對流帶橫跨巴士海峽至菲律賓。

以上的衛星資料顯示，莫拉克颱風發生於一個比颱風主渦旋大了許多的大範圍強對流帶之中，這極可能是造成強對流帶偏離颱風主渦旋的主要原因之一。何種因素造成這個罕見的特徵？如圖 4a 所示，2009 年 7 月底-8 月初期間，北南海、台灣到北菲律賓海一帶，皆籠罩在季風環流圈(monsoon gyre)之中。在此一環流圈中，前後發生了三個颱風，由西往東，最早發生的是柯尼颱風，其次是莫拉克颱風，最後是艾陶颱風。（從圖 3 的雲圖中也可以清楚看到這三個颱風。）此環流圈的範圍由西往東涵蓋  $100^{\circ}\text{E}$ - $150^{\circ}\text{E}$ ，由南往北涵蓋  $10^{\circ}\text{N}$ - $35^{\circ}\text{N}$ ，尺度遠比三個颱風大。此環流圈中的西南季風環流從東孟加拉灣一路延伸到菲律賓海，可以傳送豐沛水氣至台灣附近區域。這樣的一個大尺度環境場提供了正渦度的氣旋環

流與豐富的水氣，形成一個有利於颱風生成與發展的環境場，莫拉克等三個颱風因此在幾天之內前後發生於此環流圈內。

此環流圈的特性可以進一步由台灣鄰近海域的衛星資料得知。圖 4b 中 8/8 的 QuikScat 海面風場顯示旺盛的西南氣流由南海北部吹到台灣鄰近海域，最強的西南風風速約  $30\text{m/s}$  發生於台灣東南側蘭嶼附近。值得注意的是，颱風中心此時位於宜蘭西方，最大雨區卻發生於台灣南部與鄰近海域。圖 4b 中的西南氣流旺盛區同時也是高水氣量的區域（斜方格與紅點區），顯示西南氣流傳送大量水氣至莫拉克颱風籠罩的地區。仔細觀察海面風場發現，莫拉克颱風侵襲台灣期間，在台灣西南部外海存在一個明顯的輻合帶，主要氣流的來源為屬於颱風渦旋的西北風與西南季風的西南氣流。根據 TRMM 衛星觀測，8/5-8/11 的最大累積雨量位於台灣西南部，也正是面對西南氣流的地形迎風面以及前述輻合帶附近。

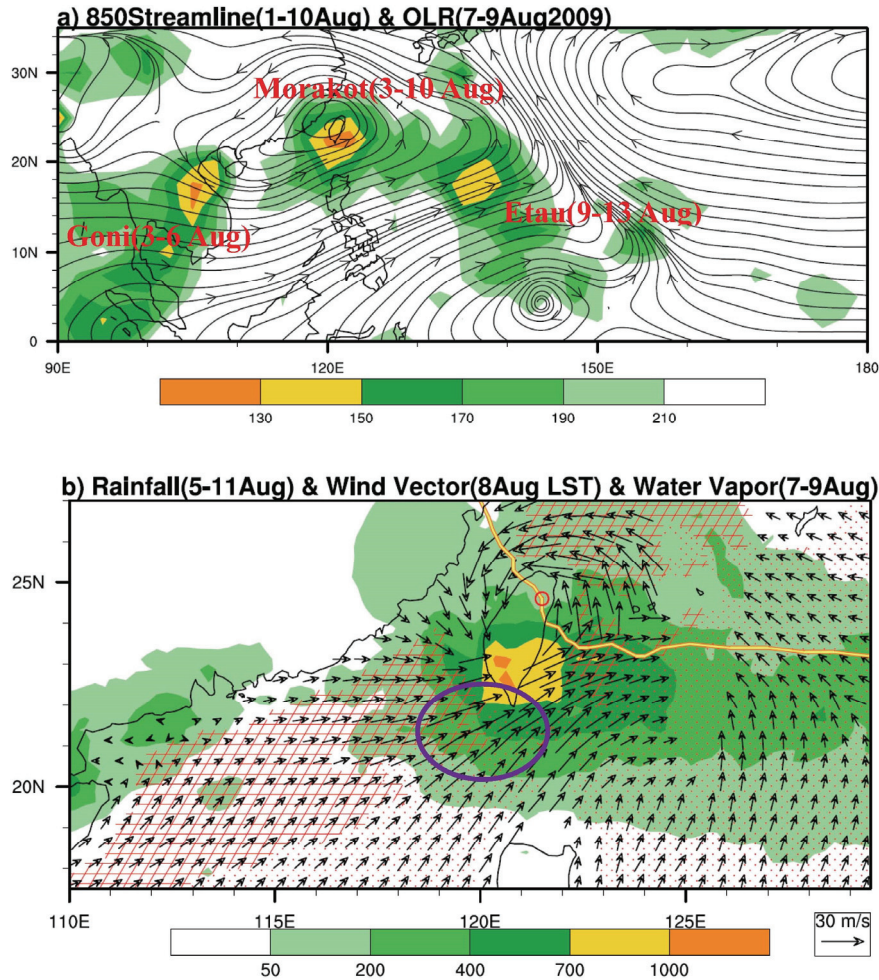


圖 4 (a) 8/1-8/10 平均 850hPa 流線場與 8/7-8/9 外逸長波輻射 (OLR)，柯尼颱風、莫拉克颱風與艾陶颱風的大致位置與生命期標示其中 (李明營提供)；  
 (b) 8/5-8/11 TRMM 累積雨量，8/7-8/9 水氣量，與 8/8 QuikScat 海面風場 (取自 Hong et al. 2010)

### 三、大尺度背景場的多重尺度特性

平均而言，東亞與西北太平洋季風的主要環流特徵為從中國南方往南海與菲律賓海延伸的季風槽，以及從太平洋往西延伸的太平洋副熱帶高壓脊。季風槽與高壓脊的強弱與相對位置是影響西北太平洋季風區與台灣天氣與氣候最主要的因素之一。如圖 4a 所示，在七月底到八月初莫拉克颱風期間，季風槽不僅旺盛，而且發展成環流閉

合的季風環流圈，形成三颱並存的情況。為了解大尺度背景環流的變化特性，我們分析了代表季風槽強弱的西北太平洋季風指數(Wang and Fan 1999)。此季風指數的定義為(5°N-15°N, 100°E-130°E)平均 850 百帕緯向風減去(20°N-30°N, 110°E-140°E)平均 850 百帕緯向風。當季風指數為正時，南北風切為負，渦度為正，季風槽強；相反的，當季風指數為負時，南北風切為正，渦度為負，季風槽偏弱。圖 5a 為西北太平洋季風指

數的 2009 年與長期平均逐日變化。平均而言，季風槽出現的期間為 7-10 月(藍線正值部分)。2009 年 4 月就有季風槽的出現，但時隱時現，7 月初季風槽正式形成，之後呈現一波波近乎週期性的振盪一直到 10 月底消失為止。值得注意的是，7

月底到 8 月初莫拉克等三個颱風同時存在的期間，季風指數為正且明顯偏強，與前述討論的季風環流圈的存在一致。

我們進一步利用小波分析診斷季風指標(亦即季風槽強度)振盪的週期特性。圖 5b 顯示 2009

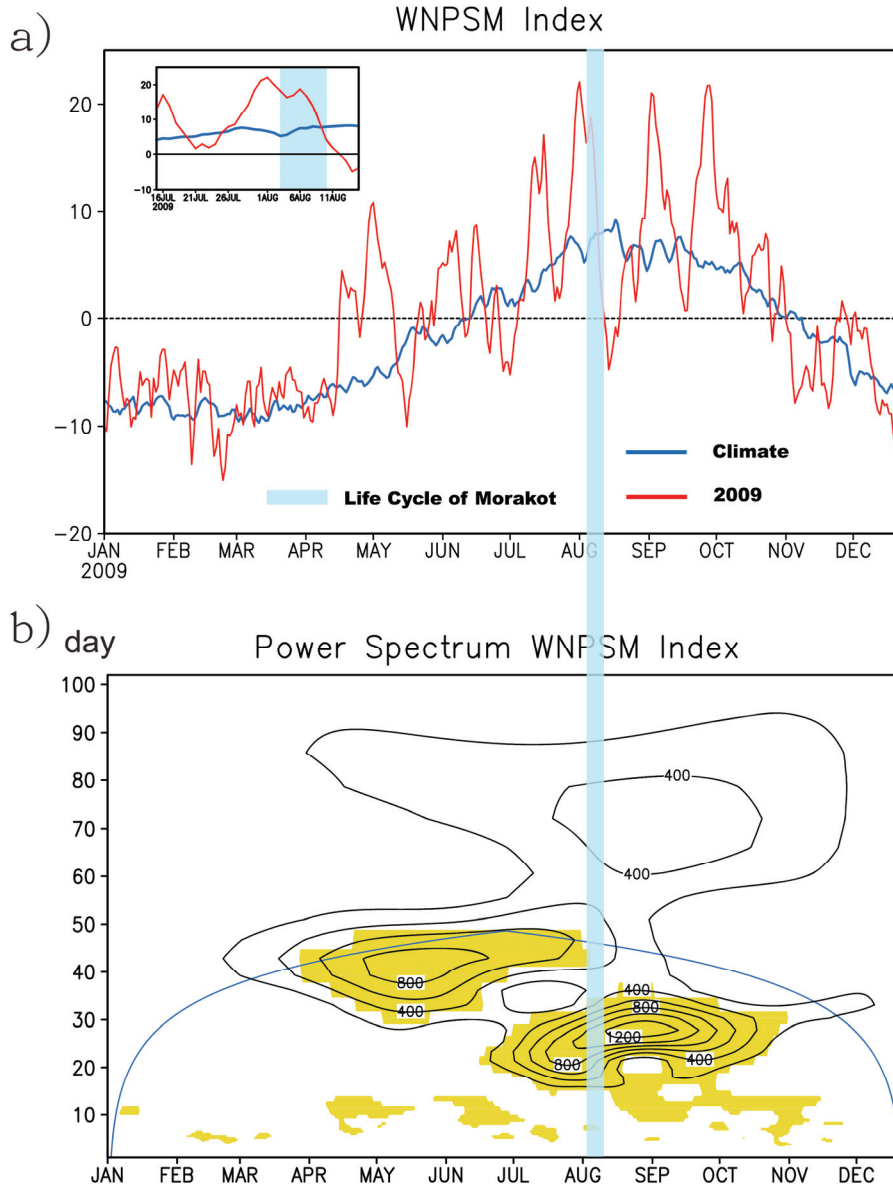


圖 5 (a) 西北太平洋季風指數的 2009 年與氣候平均之逐日變化，藍色粗線標示 7 月底-8 月初莫拉克颱風期間，左上小圖為該期間的指數。  
 (b) 西北太平洋季風指數的小波分析波譜，垂直座標為天(取自 Hong et al. 2010)。

年的季風槽振盪呈現兩個主要週期特性：30-60 天的季內振盪與 10-30 天的月內振盪。季內振盪活躍於 4-8 月，月內振盪則活躍於 7-11 月。7 月底到 8 月初期間，正好是季內振盪的尾聲（此時週期範圍縮減成 40-50 天），月內振盪逐漸達到鼎盛的時期。這段期間，天氣尺度現象（如颱風）和季內與月內振盪並存，顯示莫拉克颱風發生期間的西北太平洋季風環流呈現三種時間尺度共存的多重尺度現象。

850 百帕風場的分析顯示季風槽於 7 月底形成於菲律賓海，隨後逐漸往西北移動，在 8 月初到達台灣附近，此時也正好是莫拉克颱風形成與侵襲台灣的期間。如前述，這段期間的環流具有

多重尺度特性，我們將環流用小波分析將之分解成 2-8 天、10-30 天與 40-50 天波段，再分別重建各波段的環流。圖 6a 為 7/31 的 850 百帕風場與比濕，顯示一個水氣豐富的季風環流圈存在於 10°N-25°N 菲律賓東方海面，此環流圈南側的西風往西延伸至孟加拉灣。小波分析重建的風場則顯示該環流圈主要由 2-8 天（圖 6b）與月內擾動（圖 6c）組成（註：此一擾動並非莫拉克颱風，因為莫拉克颱風於 8/3 才形成於較高緯度偏東的海面）。圖 6a 環流圈內部尺度較小的環流主要為 2-8 天擾動，盤據 120°E-150°E 的環流圈則為月內擾動。季內擾動（圖 6d）並不直接貢獻於季風環流圈，而是在環流圈北方形成一個範圍極廣，水氣相對豐富的氣旋環流，提供有利於 2-8 天與月

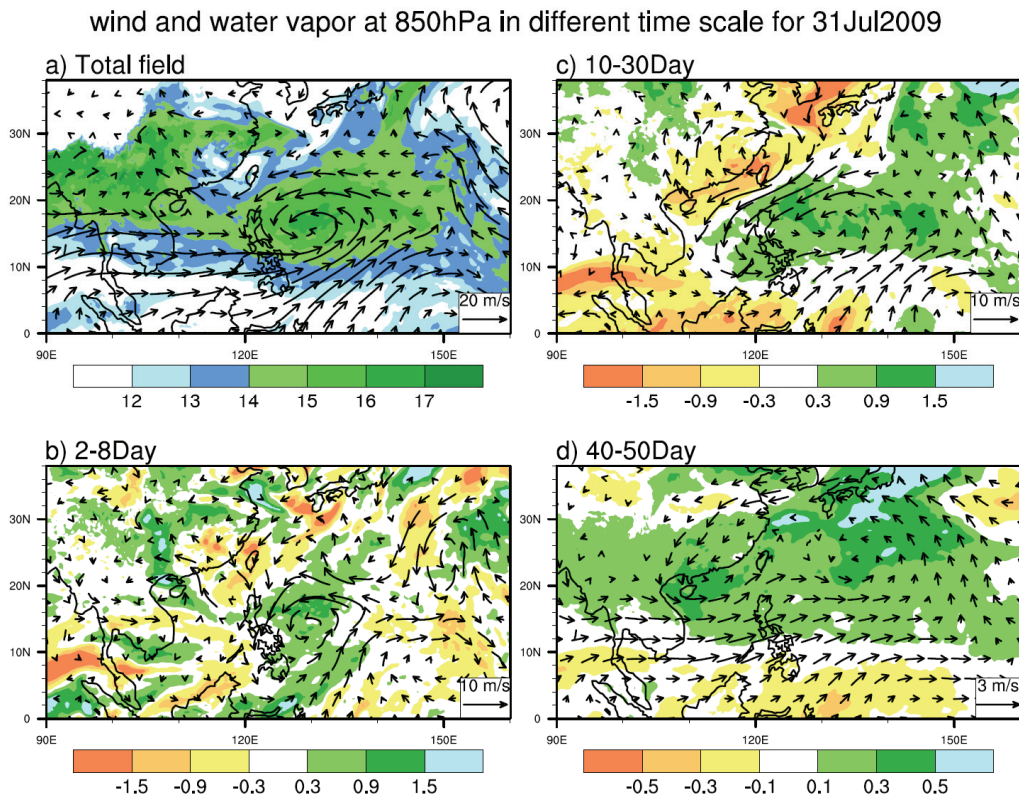


圖 6 850 百帕風場與比濕：(a)全環流場，(b) 2-8 天擾動，(c) 10-30 天擾動，(d) 40-50 天擾動（取自 Hong et al. 2010）。

內擾動繼續往北移的環境。月內擾動的空間特徵為西北-東南走向的波狀結構。在 7/31 (圖 6c 與 7a), 水氣偏少的反氣旋擾動位於台灣與台灣西北方, 在台灣東南方的菲律賓海則為水氣豐富的氣旋擾動, 更東南方赤道附近為另一個反氣旋擾動。波狀月內擾動在接下來幾天, 持續往西北方移動, 它的水氣豐沛的氣旋擾動於 8/5 到達台灣東方海面 (圖 7b)。此一氣旋擾動南側的西風擾動與南方的水氣豐沛的西南氣流連結, 形成一個往西延伸至孟加拉灣的水氣傳送帶。此時, 莫拉

克颱風已經形成, 並位於 (22°N, 130°E) 附近的海面上, 幾近消失的柯尼颱風的氣旋環流則位於海南島北方。圖 7d 顯示莫拉克颱風與柯尼颱風是位於 20°N 的東西向波長小於 3000 公里的波狀擾動中的一部份。此一由兩個反氣旋擾動與兩個氣旋擾動組成的波狀擾動藏身於月內氣旋擾動中, 空間尺度遠小於後者 (東西向橫跨約 40 個經度)。

接下來幾天, 月內氣旋擾動與 2-8 天波狀擾動繼續往西移動至台灣。圖 7c 與 7e 分別為 8/8

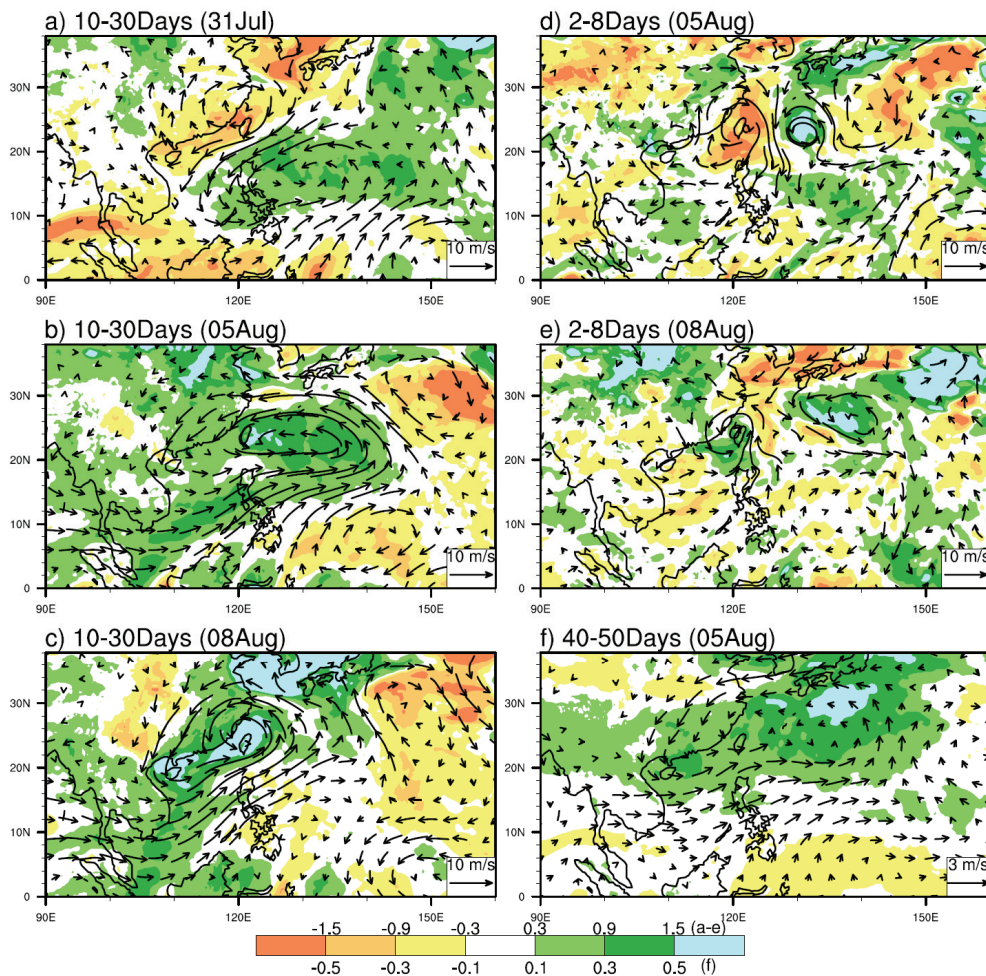


圖 7 850 百帕風場與比濕：(a)-(c) 7/31, 8/5, 8/8 的 10-30 天擾動，(d)-(e) 8/5, 8/8 的 2-8 天擾動，(f) 8/5 的 40-50 天擾動 (Hong et al. 2010)。



的月內與 2-8 天擾動。籠罩於台灣附近的氣旋擾動主要為月內擾動，除了水氣豐沛之外，連結於南方的水氣傳送帶亦可往西上溯至孟加拉灣，持續對台灣鄰近區域與莫拉克颱風提供豐沛的水氣。此時，2-8 天擾動的波狀擾動已經不明顯，主要的結構為籠罩台灣且尺度遠小於月內擾動的氣旋擾動。在此一段期間，季內氣旋擾動一直存在於北南海、台灣與北菲律賓海一帶，並緩慢往北移動，持續提供有利於 2-8 天與月內擾動發展的潮濕氣旋環境場（圖 7f）。

如果只是大尺度環境場提供的有利條件還不致於產生破紀錄的雨量與災害。在水氣充沛的西南氣流盛行的環境中，中尺度對流在台灣西南部陡峭地形的影響下，經常在台灣南部產生超大豪

雨(Chen and Chen 2003, Wu et al. 2002)。類似的情形也發生於莫拉克颱風侵襲台灣期間。圖 8a 為 8/7-8/9 台灣各雨量站累積雨量分佈圖，顯示超過 1500 毫米的雨量都發生位於中央山脈西南邊的嘉義到高雄山區，位於颱風主渦旋附近的台灣北部雨量反而都不及 500 毫米。8/8 是中南部雨量最大的時段，此時颱風中心位於新竹附近，但是最大的 925hPa 水氣輻合帶發生於南部山區斜坡上，其次為嘉義雲林西方海面上的輻合帶（圖 8b）。前者位於盛行西風與西南風受到地形舉升影響的地區，後者則位於颱風渦旋造成的西北風與西南季風的輻合區。圖 8c 為沿北緯 23 度的水氣傳送與水平輻合垂直剖面，顯示在台灣陡峭地形的迎風面上，形成一個水氣垂直傳送與水平輻合

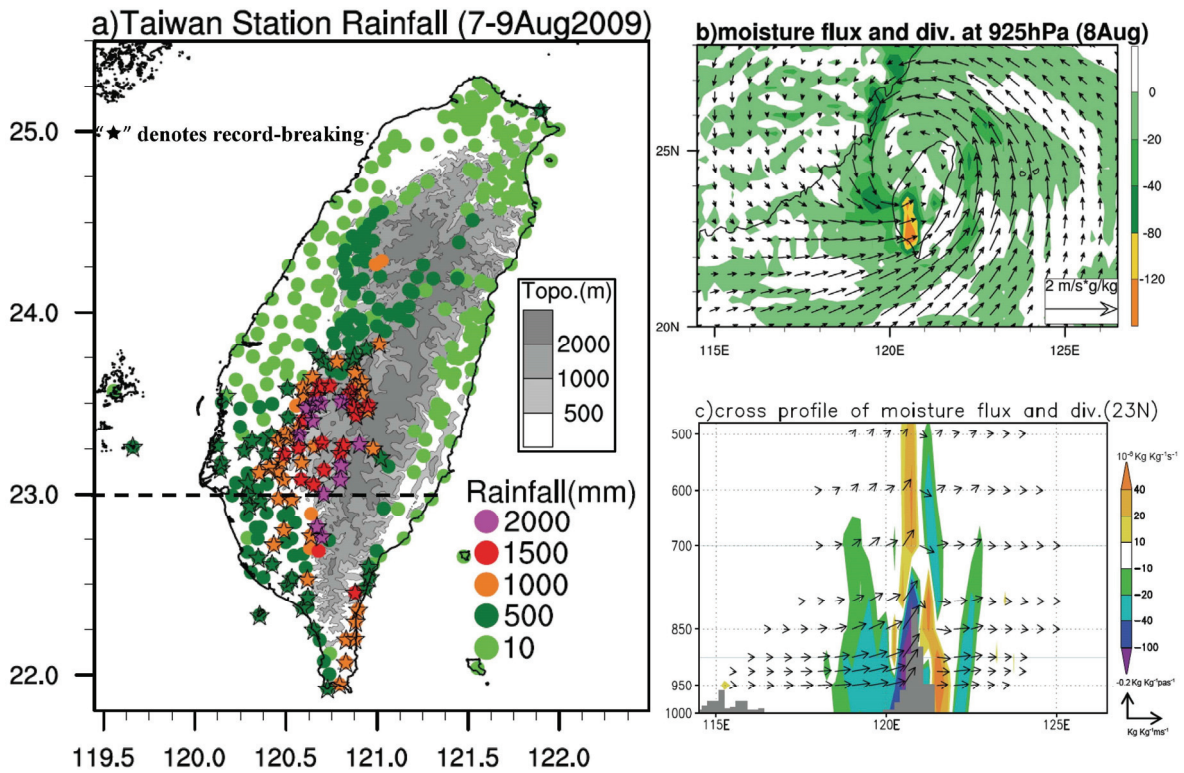


圖 8 (a) 8/7-8/9 累積雨量分佈圖，(b)YOTC 925 百帕水氣傳送與輻合（單位： $10^{-6} \text{ Kg Kg}^{-1} \text{ s}^{-1}$ ），(c)北緯 23 度 YOTC 水氣傳送與水平輻合。

的極大值區。此時，在西方海上亦有一個次大的水氣輻合帶，但是強度僅是前者的 1/3-1/4。此一分析明顯確認台灣南部陡峭地形在此一破紀錄的超大豪雨事件中扮演極其重要的角色(Ge et al. 2010)。

以上分析結果顯示，莫拉克颱風期間，西北太平洋環流具有明顯的多重尺度現象，其中包括天氣、月內與季內時間尺度。天氣尺度擾動分析發現，颱風渦旋存在於一個位於 20°N 由東往西移動的東西向天氣尺度(小於 3000km)的波狀結構中。月內擾動則在菲律賓海，以西北東南走向的較大尺度波狀結構，從近赤道區域往西北朝台灣移動，其中的氣旋環流為 7 月底-8 月初季風槽與季風環流圈形成的主因，並建立由孟加拉灣至台灣鄰近地區的水氣傳送帶，對莫拉克颱風持續提供豐沛的水氣。更大空間尺度緩慢北移的季內氣旋則提供有利於天氣與月內尺度擾動發展的環境。在莫拉克颱風侵襲颱風期間，月內氣旋擾動的存在形成颱風南側大範圍的對流帶。莫拉克颱風沿此一對流帶北緣移動，由於大範圍對流帶與

西南季風環流位於颱風南側，加上南部陡峭地形對水氣豐沛的西南氣流的舉升作用，颱風渦旋附近的對流反而比南側弱，形成偏南的不對稱對流分佈，導致近颱風中心的台灣北部雨量不如預期的多，強對流與超大豪雨反而發生於台灣南部。

#### 四、乾旱的季節環流特徵

莫拉克颱風侵台之前，台灣整體雨量不足，面臨乾旱危機，並有停止二期稻作的倡議。此一想法後因莫拉克颱風在短時間內帶給台灣近 50 年最大的雨量而作罷。實際上，莫拉克颱風過後，台灣南部立即回復到雨量嚴重缺乏的狀況。以台南為例，莫拉克颱風之後，雨量幾乎為零，加上上半年雨量已經嚴重缺乏，2009 年總雨量，即使包括莫拉克颱風帶來的超大的雨量，還是少於長期氣候平均雨量。若扣除莫拉克颱風帶來的雨量，則 2009 年全年雨量，約僅比氣候值的 1/3 多一點(圖 9)。

類似的雨量偏少情形也發生於中南部測站

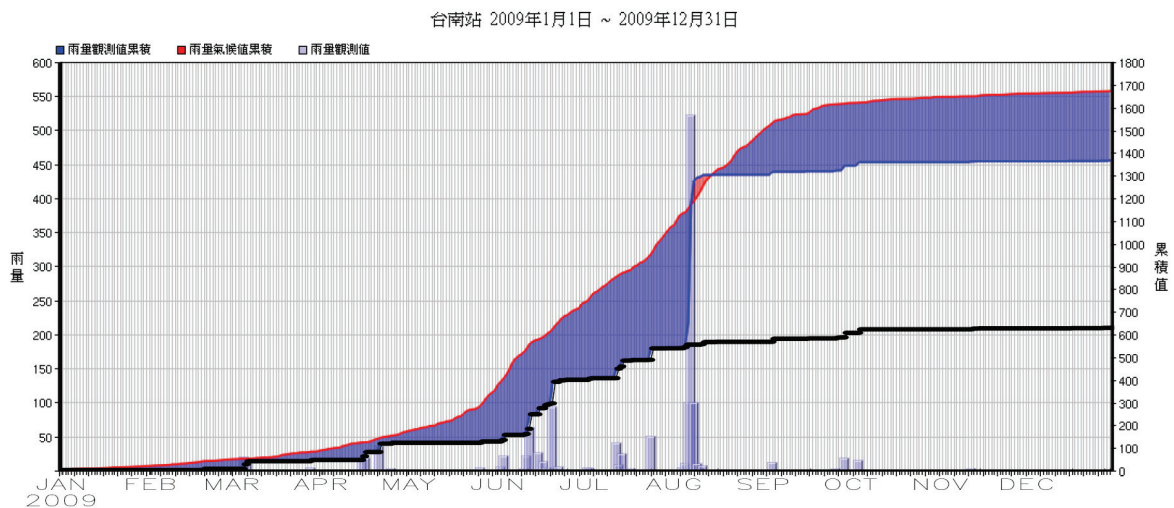


圖 9 2009 年(藍線)與氣候平均(紅線)台南測站逐日累積雨量曲線，柱狀圖為日雨量，黑線為扣除莫拉克颱風期間雨量的 2009 年逐日累積雨量曲線。

(如嘉義、高雄、台東、恆春)。北部測站(如台北)因為莫拉克颱風帶來的雨量不多，全年雨量僅約氣候值的 2/3。本研究分析台灣各測站 2009 年總雨量百分位分佈(圖 10)發現，僅有阿里山、玉山與花蓮雨量超過 80 百分位，屬於偏多的情況，許多測站雨量都不到 50 百分位，台灣西北部與台東測站雨量更是不到 20 百分位。此一現象反映，雖然發生了帶來劇烈降雨的莫拉克颱風，2009 年西北太平洋夏秋季環流其實不利於台灣附近降雨的發生。2009 年西北太平洋颱風總數為 22，少於長期平均個數 26.6。若以颱風路徑而言，2009 年約半數颱風路徑偏西且偏南，另外半數颱風則在 130°E 以東就已經往北移行，若不計入來回徘徊且偏南的芭瑪颱風，實際經過台灣附近的颱風僅有兩個。

2009/1/1-2009/12/31

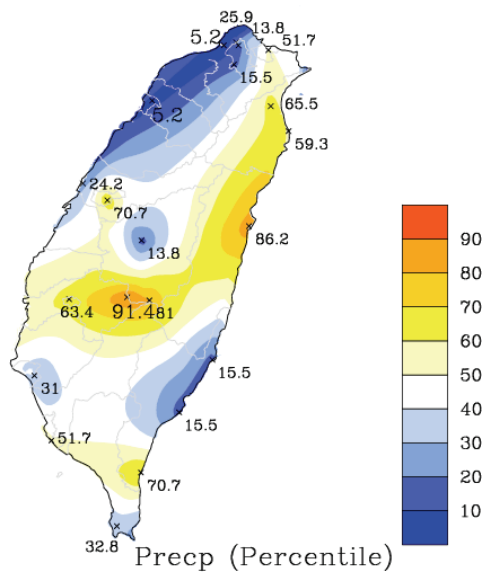


圖 10 2009 年各測站雨量百分位。

以上台灣雨量與颱風路徑分析顯示，以大環境而言，2009 年颱風季對台灣而言實際上是一個相對的乾季。這可由熱帶對流與環流的分析看出端倪。圖 11 的 7-9 三個月 OLR 距平場顯示，2009

年颱風季較強的熱帶對流發生於 140°E 以東與 20°N 以南熱帶西北太平洋；相反的，台灣一帶對流偏弱。主要的原因是 2009 年 7-9 月颱風季，季風槽偏南且偏東，較強的大尺度氣旋環流比往年偏向赤道，台灣反而處於季風槽的北緣，平均而言，處於大尺度的東風帶與下沉區，大尺度西南氣流偏弱，水氣不足且不利於對流的發展，雨量自然偏少。以更大尺度而言，2009 年颱風季期間，從南亞到台灣的 20°N-30°N 緯度帶，都是處於對流偏弱的情況。

這樣的異常環流與對流的配置，很可能與 2009 年夏季期間熱帶太平洋海溫偏高有關。如圖 12 (上) 所示，2009 年 7-9 月，整個熱帶太平洋的海溫都高於氣候值，其中 Nino3.4 區域海溫比氣候值高約 1°C，Nino1+2 區域海溫距平值更高。一般而言，聖嬰現象發生時，中/東熱帶太平洋海溫高於平均值，但是換日線以西的熱帶太平洋的海溫低於平均值。(註：印度洋與熱帶西太平洋海溫過去幾十年呈現明顯增溫現象，扣除線性增溫趨勢後，2009 年 7-9 月 130°E 以東的熱帶太平洋海溫仍舊偏高。) 因此，2009 年整個熱帶太平洋海溫偏高的狀況與標準聖嬰現象的海溫距平不一致。即使如此，Nino3.4 海溫還是高於平均值，仍然可能影響西北太平洋的環流與對流。圖 12 (下) 為 Nino3.4 海溫與 500 百帕垂直速度的相關係數圖，顯示當 Nino3.4 海溫偏高時，不僅 180-120°W 熱帶地區上升氣流加強，15°N 以南熱帶西北太平洋地區的上升氣流也變強，但是包括台灣在內的 15°N-30°N 的西北太平洋地區則是下沉運動距平。低對流層環流的計算也顯示熱帶西北太平洋為氣旋環流距平，台灣一帶則為反氣旋環流距平。如此的環流/對流配置與 2009 年 7-9 月環流/對流特徵(圖 11)一致，不利於台灣鄰近區域對

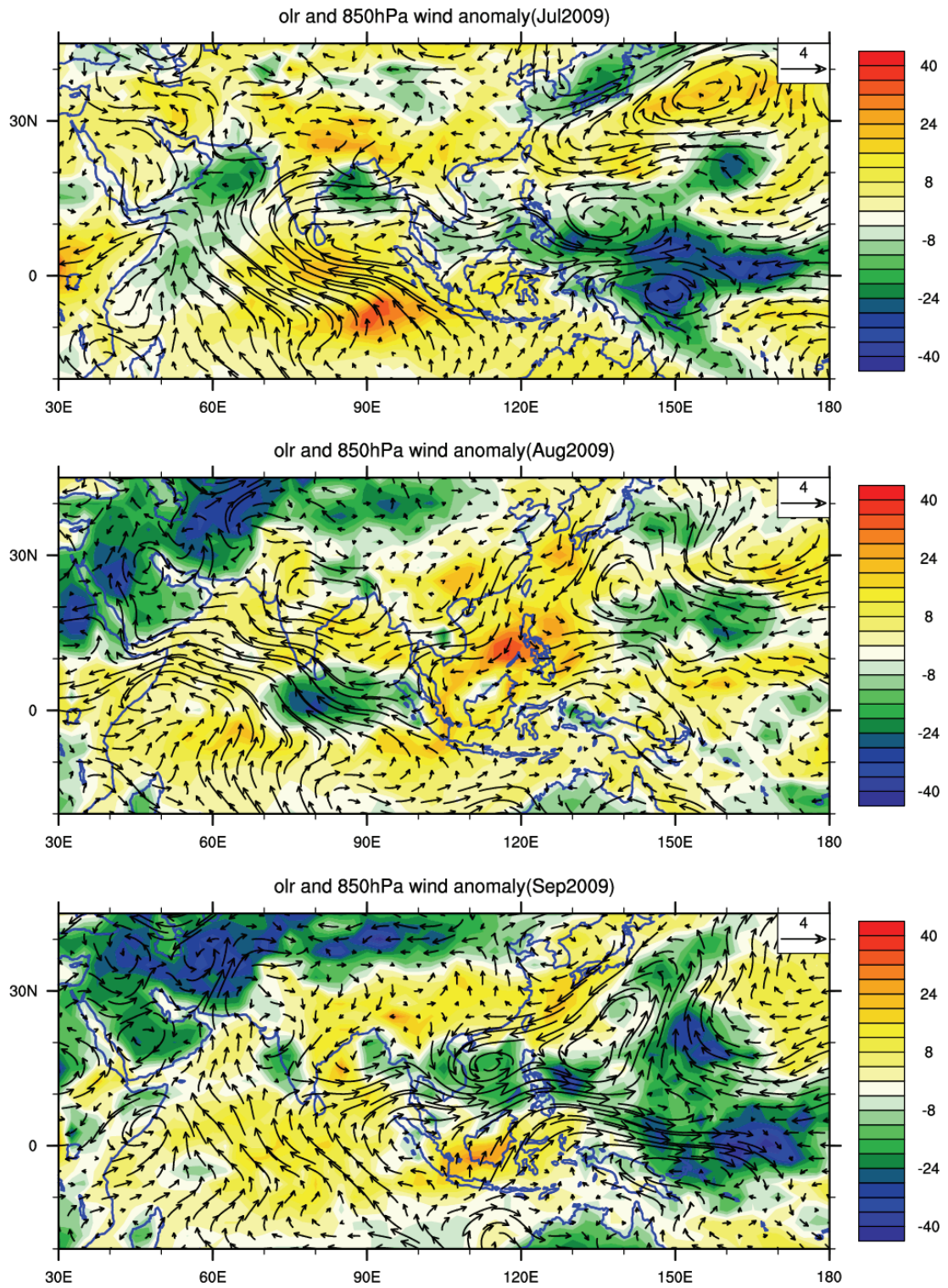


圖 11 2009 年 7-9 月外逸長波輻射與 850 百帕風場距平圖。

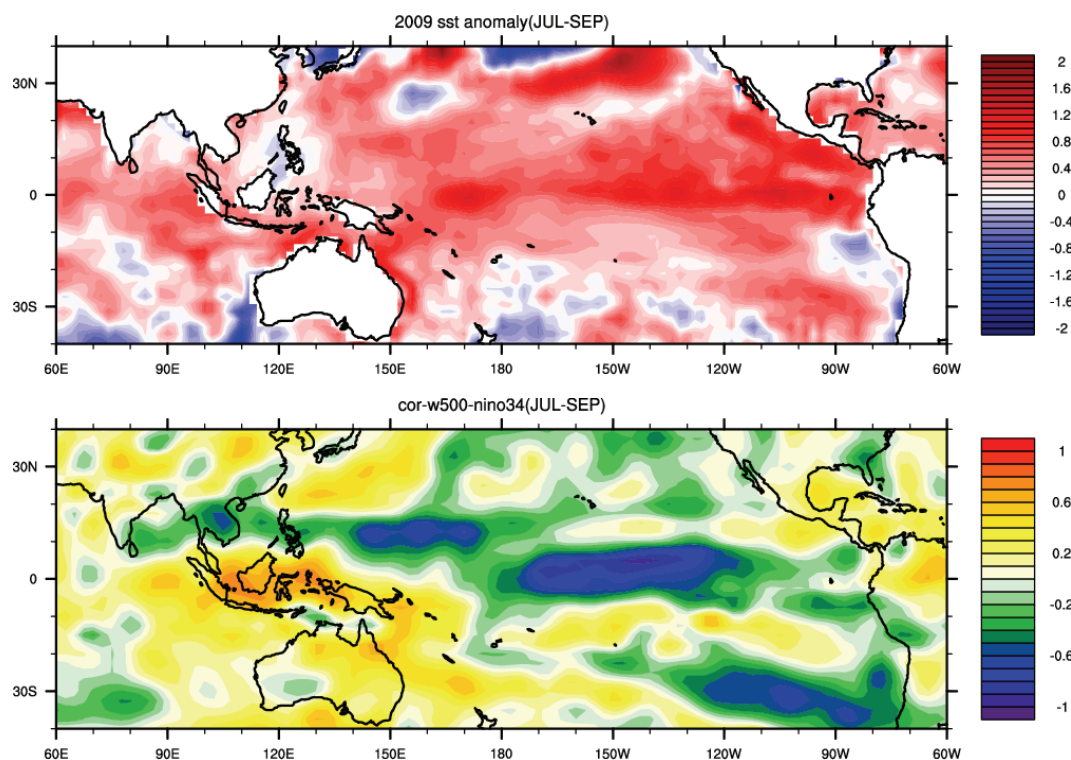


圖 12 (上) 2009 年 7-9 月海溫距平, (下) 7-9 月 Nino3.4 與 500 百帕垂直速度的相關係數  
(資料: NCEP 重分析 1979-2008)。

流的發展。由此判斷, 2009 年台灣鄰近區域的偏乾趨勢可能與偏高的熱帶中/東太平洋海溫有關。可能機制如下: 較高的海溫引發熱帶中/東太平洋較強的對流與 Matsuno-Gill 環流, 使得季風槽偏南且偏東, 15°N 以南熱帶西北太平洋的對流因此變強, 形成類哈德理胞的熱力直接環流的上升區, 且在台灣一帶的副熱帶形成下沉氣流距平。

莫拉克颱風的雨量在台灣許多測站創下 50 年來的新紀錄, 此一現象是否普遍發生於更廣大的地區, 值得進一步探討。圖 13 的 2009 年 7-9 月雨量百分位圖顯示 20°N 以南的西北太平洋的雨量普遍高於 90 百分位, 在 1979-2009 年間屬於高度異常的年份。相反的, 在 120°E-140°E 與 160°E-180°E 的副熱帶 (20°N-40°N), 雨量則小於 20 百分位, 呈現極端偏少的現象。850hPa 比濕與

海溫則是幾乎整個熱帶西北太平洋 (如 30°N 以南) 都高於 90 百分位, 分別在 1948-2009 年間與 1854-2009 年間屬於高度異常的年份。比濕與海溫的一致性反映溫度高-飽和水氣量高的空氣熱力性質。降雨則不然, 因為降雨與否, 除了熱力條件, 還受到環流的動力控制。溫度與比濕雖高, 若發生於下沉區, 仍不會造成降雨。2009 年 7-9 月台灣鄰近地區就是屬於這樣的特性, 與前述討論的環流特徵一致。

整體而言, 2009 年 7-9 月西北太平洋的大尺度環流特徵不利於台灣鄰近地區對流的發生, 亦即延續前半年的氣候特徵, 台灣仍處於偏乾旱的氣候型態。但是由於 7 月底-8 月初月出現一個短暫的空檔, 讓原本活躍於南菲律賓海的對流性環流透過月內與季內擾動移行至台灣附近, 導致莫

拉克颱風伴隨月內擾動挾帶豐沛水汽侵襲台灣，造成破紀錄的超大豪雨與災害。

夏季氣候的西北太平洋地區是否也有類似的趨勢，甚至對莫拉克颱風有所影響？

圖 14 為西北太平洋 7-9 月海溫、雨量與 850hPa 比濕的線性變化趨勢，其中雨量為 1979-2009 年資料，海溫與比濕為 1948-2009 年資料。結果顯示，西北太平洋 30°N 以南的降雨在

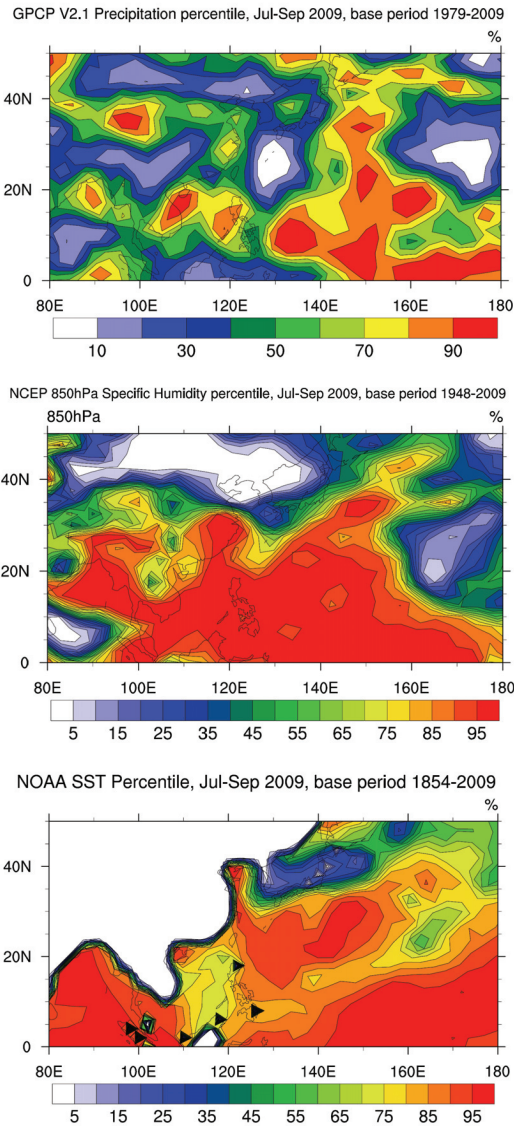


圖 13 2009 年夏季雨量、850hPa 比濕與海溫距平百分位

### 五、長期變化趨勢

根據 IPCC 第四份評估報告 (AR4)，全球平均地面氣溫於過去一百多年呈現上升趨勢，而且有越來越加速的現象。影響颱風活躍程度與台灣

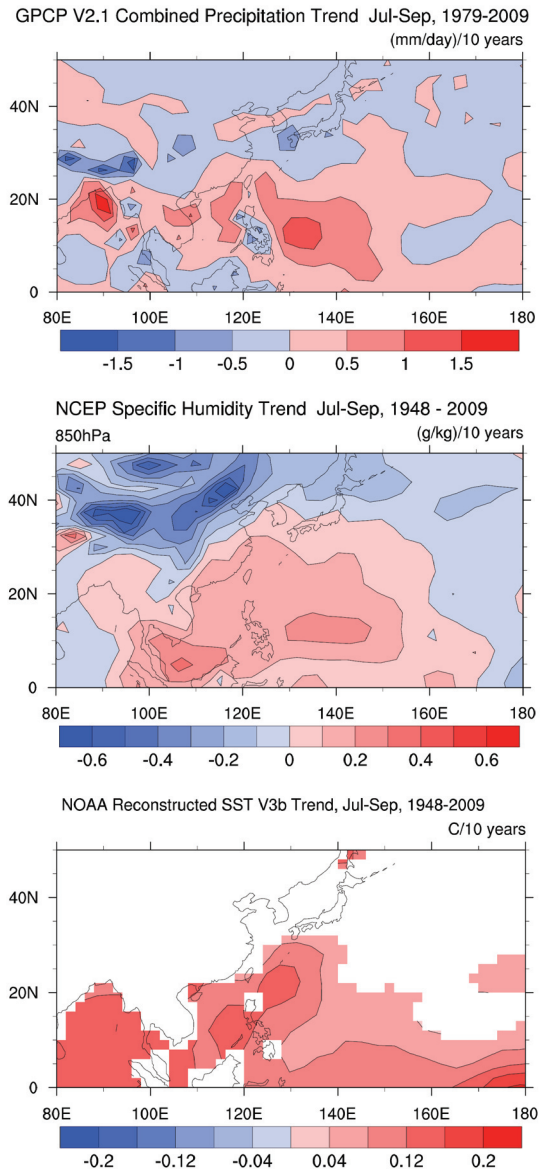


圖 14 雨量、比濕與海溫的線性趨勢，單位分別為 (mm/day)/10years，(g/Kg)/10years，°C/10years。

1979-2009 年間呈現增加的趨勢，850hPa 比濕與海溫也在 1948-2009 年間呈現明顯的上升趨勢。進一步分析則顯示前述三變數的實際變化趨勢並非線性上升或下降，而是呈現跳躍式的年代際變化特徵。

圖 15 為 10°N-25°N, 110°E-150°E (亦即圖 15 中線性變化趨勢最明顯區域) 區域平均海溫、比濕與雨量的 7-9 月平均值的逐年變化。為了方便比較，全球平均地面溫度也繪製於圖中。在 1979-2009 年間，雨量呈現明顯年際變化，但是 1990 年左右雨量突增，但無明顯持續增強的趨勢。在溫度與比濕方面，無論是選取的區域或全球平均，在 1970 年代與 1980 年代初之後，都大致呈現上升趨勢，尤其以全球溫度最為明顯。選定的西北太平洋區域海溫雖然呈現上升趨勢，1990 年代中之後海溫明顯比 1980 年代高，此一變化方式與雨量大致相似。比濕的上升趨勢在 1950-1980 年間較為明顯，1980 與 1990 年代以年際變化為主，趨勢不明顯，但在 2000 年之後，則有明顯增加後上下振盪的現象。

上述結果顯示過去三十年，熱帶西北太平洋的溫度、水氣與雨量都呈現增加的現象，唯其

變化方式並非如全球氣溫明顯的線性上升，而是呈現跳躍性的年代變化，顯現另有大尺度的年代際變化影響西北太平洋的大氣與海洋氣候狀態。西北太平洋颱風數目的變化也呈現年代際振盪的現象：1958-1972 與 1989-1997 偏多，1973-1988 與 1998 至今偏少。其中以 1989-1997 的持續偏多與 1998 至今的持續偏少，最為明顯。此一振盪與太平洋海溫與環流的年代際振盪有關，但是實際機制為何，仍未有定論(Chan 2008)。

國科會與災害防救中心的最近研究(周與陳, 2010)發現，1970-2009 年間，前 30 名最大颱風豪雨有 14 次發生於 2000 年之後。在同一期間，台灣總雨量無明顯增加或減少，但是颱風雨對年雨量的貢獻從 1970 年代的 15% 增加至 2000 年之後的 30%。Liu et al. (2009) 也發現全球平均溫度較高的年份，全球與台灣的大雨強度都有明顯加強的現象。由於影響氣候變化的因子相當多元與複雜，這些雨量強度加強的現象到底是屬於大氣自然變異的一部份，還是與全球暖化有關，目前的研究仍未能有定論，仍有待理論、觀測與模擬的突破，方可能有確切答案。氣候變化影響的是氣候系統的統計特性，單一颱風的特性可能

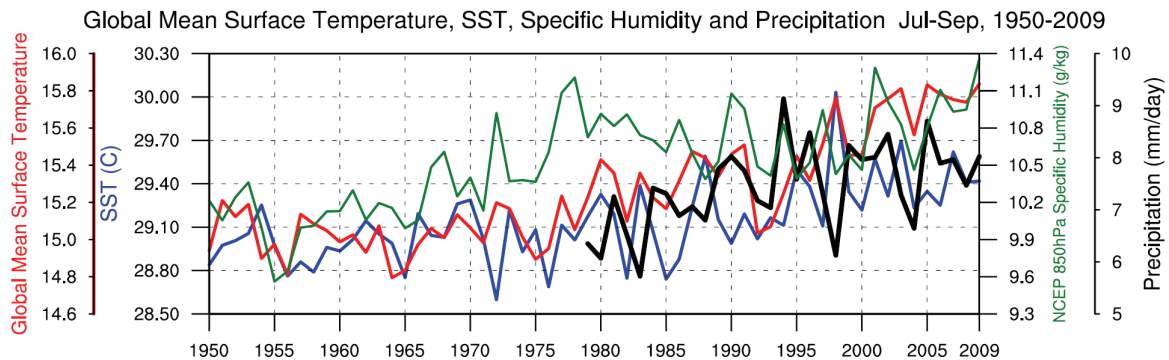


圖 15 全球平均地面溫度(紅色)、7-9 月區域(10°N-25°N, 110°E-150°E) 平均之海溫(藍色)、比濕(綠色)與雨量(黑色)逐年變化曲線。資料長度：雨量為 1979-2009，其他為 1948-2009。

受到許多隨機因素的影響，無法判斷是否是因為特定氣候變化所造成。因此，莫拉克颱風是否因為過去一、二十年來較高的溫度與水氣而產生破紀錄的雨量，無法從目前的資料分析得到結論。較重要的問題是「2000年以來較大的颱風雨量是否因為西北太平洋較高的海溫與水氣而發生？」。未來研究可以採用數值模擬方式，嘗試去破解此一謎題。

## 六、結論與建議

綜合以上章節，本研究的主要結論如下：

1. 莫拉克颱風發生於大範圍對流帶的北側，對流帶尺度大於颱風主渦旋尺度。此一深對流帶是造成不對稱且偏南的劇烈颱風雨帶的主要因素之一。

2. 莫拉克颱風發生於大尺度季風環流圈內，西南季風環流提供充足的水氣。此一大尺度背景環流具多重尺度特性，包括颱風渦旋、東南往西北移動的 10-30 天擾動的氣旋環流、南往北移動的 40-50 天擾動氣旋環流。

3. 在莫拉克颱風侵襲颱風期間，10-30 天擾動是大尺度水氣輻合的主要來源，並在颱風南側形成大範圍對流帶。莫拉克颱風沿此一對流帶北緣移動，由於大範圍對流帶與西南季風環流位於颱風南側，加上南部陡峭地形對水氣豐沛的西南氣流的舉升作用，颱風渦旋附近的對流反而比南側弱，形成偏南的不對稱對流分佈，導致近颱風中心的台灣北部雨量不如預期的多，強對流與超大豪雨反而發生於台灣南部。

4. 莫拉克颱風發生於 2009 乾旱年：2009 年 7-9 月，菲律賓海雨量、水氣量與海溫高於 90 百分位（即前百分之十），屬於高度異常。季風槽偏

南且偏強，台灣處於下沉區屬於偏乾旱的氣候型態，鄰近海域不利颱風生成與發展，大多數颱風路徑偏南偏西，判斷與中太平洋偏暖海水有關。

5. 雖然處於偏乾的氣候型態，由於 7 月底-8 月初出現一個短暫的空檔，讓原本活躍於南菲律賓海的對流性環流透過月內與季內擾動移行至台灣附近，導致莫拉克颱風伴隨月內擾動挾帶豐沛水汽侵襲台灣，造成破紀錄的超大豪雨與災害。

6. 過去三十年，熱帶西北太平洋的溫度、水氣與雨量都呈現增加的現象，唯其變化方式並非如全球氣溫明顯的線性上升，而是呈現跳躍性的年代變化，顯現另有大尺度的年代際變化影響西北太平洋的大氣與海洋氣候狀態。西北太平洋颱風數目的變化也呈現年代際振盪的現象。

7. 氣候變化影響的是氣候系統的統計特性，單一颱風的特性可能受到許多隨機因素的影響，通常無法判斷是否由特定氣候變化所造成。莫拉克颱風是否因為過去十年來較高的溫度與水氣而產生破紀錄的雨量，無法從目前的資料分析得到結論。

為瞭解過去氣候變化與推估未來氣候變遷對颱風活躍程度的影響，我們對未來研究方向的建議如下：

1. 颱風研究、模擬與預報應考慮颱風與大尺度背景環流之間的多重尺度交互作用。

2. 西北太平洋的大尺度大氣環流與海洋呈現長期變化趨勢，海溫上升明顯，應審慎評估此一趨勢的成因與對颱風生成、發展與路徑的影響，以及是否造成近年來颱風雨強度的增強。

3. 夏季西北太平洋大氣擾動具有多重尺度特性，模擬與預報模式必須能準確掌握此一多重尺



度交互作用過程，方能提高颱風預報準確度。高解析大氣模式（甚至海氣耦合模式）是國內提升颱風研究與模擬/預測準確度不可或缺的關鍵，宜以無接縫觀念，積極研發高解析全球模式。

## 參考文獻

- 周仲島、陳永明，2010：台灣地區劇烈降雨與侵台颱風變異趨勢與辨識研究 III。國家科學委員會研究成果報告。
- Chan, J. C. L., 2008: Decadal variations of intense typhoon occurrence in the western North Pacific. *Proc. Royal Soc. A*, **464**, 249-272.
- Chen, C.-S., and Y.-L. Chen, 2003: The rainfall characteristics of Taiwan. *Mon. Wea. Rev.*, **131**, 1323-1341.
- Chen, T.-C., S.-Y. Wang, M.-C. Yen, and A. J. Clark, 2007: Effect of monsoon gyre on the typhoon activity in the western North Pacific Genesis. *Mon. Wea. Rev.*, **46**, 1324-1340, 2007.
- Camargo, S. J., A. W. Robertson, S. J. Gaffney, P. Smyth, and M. Ghil, 2007a: Cluster analysis of typhoon tracks. Part I: General properties. *J. Climate*, **20**, 3635-3653.
- , ——, ——, ——, and ——, 2007b: Cluster analysis of typhoon tracks. Part II: Large-scale circulation and ENSO. *J. Climate*, **20**, 3654-3676.
- Elsberry, R. L., 2004: Monsoon-related tropical cyclones in East Asia. In 'East Asian Monsoon', World Scientific Series on Meteorology of East Asia Vol. 2, Ed. C.-P. Chang, World Scientific, Singapore, 463-498.
- Gray, W. M., 1978: Hurricanes: Their formation, structure and likely role in the tropical circulation. *Meteorology over the Tropical Oceans*, D. B. Show, Ed., Roy. Meteor. Soc., 155-218.
- Ge, X., T. Li, and S. Zhang, 2010: What causes the extremely heavy rainfall in Taiwan during Typhoon Morakot (2009)? *Atmos. Sci. Lett.*, **11**, 46-50, doi:10.1002/asl.255.
- Harr, P. A., and R. L. Elsberry, 1995: Large-scale circulation variability over the tropical western North Pacific. Part I: Spatial patterns and tropical cyclone characteristics. *Mon. Wea. Rev.*, **123**, 1225-1246.
- Hong, C.-C., H.-H. Hsu, M.-Y. Lee, and J.-L. Kuo, 2010: Role of Submonthly Disturbance and 40-50-day ISO on the Extreme Rainfall Event Associated with Typhoon Morakot (2009) in Southern Taiwan. accepted by *Geophys. Res. Lett.*
- Hsu, H.-H., and C.-H. Weng, 2001: Northwestward propagation of the intraseasonal oscillation in the western North Pacific during the boreal summer: Structure and mechanism. *J. Climate*, **14**, 3834-3850.
- Hsu, H.-H., 2005: Intraseasonal variability in the East Asian and WNP North Pacific summer monsoon region. Ed. K.-M. Lau and D. Waliser, Springer-Praxis, 65-98.

- Ko, K.-C., and H.-H. Hsu, 2006: Submonthly circulation features associated with tropical cyclone tracks over the East Asian monsoon area during July–August season. *J. Meteor. Soc. Japan*, **84**, 871-889.
- Ko, K.-C., and H.-H. Hsu, 2009: ISO Modulation on the submonthly wave pattern and recurving tropical cyclones in the tropical western North Pacific. *J. Climate*, **22**, 582-599.
- Liebmann, B., H. H. Hendon, and J. D. Glick, 1994: The relationship between tropical cyclones of the western Pacific and Indian Oceans and the Madden–Julian oscillation. *J. Meteor. Soc. Japan*, **72**, 401-411.
- Liu, S. C., C. Fu, C.-J. Shiu, J.-P. Chen, and F. Wu, 2009. Temperature dependence of global precipitation extremes, *Geophysical Research Letters*, 36, L17702, doi:10.1029/2009GL040218.
- Maloney, E. D., and M. J. Dickinson, 2003: The intraseasonal oscillation and the energetics of summertime tropical Western North Pacific synoptic-scale disturbances. *J. Atmos. Sci.*, **60**, 2153-2168.
- Nakazawa, T., 1986: Intraseasonal variations of OLR in the tropics during the FGGE year. *J. Meteor. Soc. Japan*, **64**, 17-34.
- Wang, B. and Z. Fan, 1999: Choice of South Asian summer monsoon indices. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **80**, 629-638.
- 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. *Wea. and Forecasting*, **17**, 1001-1015.

# Multiscale Background Flow of Typhoon Morakot

Huang-Hsiung Hsu<sup>1</sup>, Chi-Cheng Hong<sup>3</sup>, Chun-Hsiung Weng<sup>1</sup>,  
Ming-Ying Lee<sup>1,5</sup>, Tzu-Ting Lo<sup>5</sup>, Jui-Ling Kuo<sup>1</sup>,  
Ken-Chung Ko<sup>4</sup>, Chia Chou<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Department of Atmospheric Sciences, National Taiwan University

<sup>2</sup> Research Center for Environmental Changes Academia Sinica

<sup>3</sup> Department of science Taipei Municipal University of Education

<sup>4</sup> Department of Geography National Kaohsiung National University

<sup>5</sup> Central Weather Bureau

(manuscript received 15 May 2010 ; in final form 30 June 2010)

## ABSTRACT

Typhoon Morakot (2009) occurred almost simultaneously with Typhoon Goni and Etau within a monsoon gyre in the Western North Pacific. The southwesterly monsoon flow in the southern flank of the gyre supplied abundant moisture and formed a large-scale convection-active region, which is much larger than the size of typhoon vortex. The large-scale circulation during the lifetime of typhoon Morakot was characterized by multiscale circulations including typhoon vortex and the cyclonic circulation embedded in the northwestward-moving 10-30 day and northward-moving 40-50 day disturbances. During the influencing period of Morakot on Taiwan, the 10-30 day disturbance was the major moisture supplier and formed the large-scale convective region south of the typhoon, which moved westward along the northern flank of this convection belt. The combined effect of the strong monsoonal southwesterly/convection belt in the south and the lifting effect of the steep terrain in southern Taiwan resulted in the southward-shifted convection zone associated with the typhoon. As a result, the strong convection and heavy rainfall occurred in southern Taiwan, instead of in northern Taiwan where the typhoon center passed.

During July-September 2009, sea surface temperature, low-level specific humidity, and rainfall were anomalously high by exceeding 90 percentile in most part of the Philippine Sea. The stronger-than-normal monsoon trough shifted anomalously southward. As a result, Taiwan was located in a region of anomalous subsidence and deficit rainfall. The typhoon tracks in the 2009 typhoon season shifted southward and moved westward. These anomalous features, which were likely the results of the anomalous warm SST in the central equatorial Pacific, indicate that Taiwan was actually in a severe drought condition during 2009 typhoon season. This dry and stable condition was temporarily interrupted by the move-in of the 10-30 day and 40-50 day perturbation from the tropical Philippine Sea during late July and early August and resulted in the record-breaking rainfall in Taiwan.

**Key Words:** Typhoon Morakot (2009), multiscale interaction, 10-30 day wave, intraseasonal oscillation

