

行政院所屬各機關出國報告
(出國類別：研究)

全球模式一週與月的系集統計結果輸出
系統，提供機率、降尺度預報結果
-- 熱帶季內振盪監測預報技術研發

服務機關：交通部中央氣象局
姓名職稱：陳雲蘭 技正
派赴國家：美國
出國期間：105年6月1日至11月30日
報告日期：106年2月10日

摘 要

近年全球面對氣候變遷的挑戰，強調需建立具有氣候韌性的社會，提供早期預警，一週以上的展期天氣預報(或稱為次季節預報)因此也愈來愈受到重視。熱帶季內振盪(MJO)是支持次季節科學預報最重要的物理基礎之一，各國所發展的數值預報模式也被期待能有效模擬及預測 MJO，使能提供展期天氣預報的服務。美國國家環境預測中心所屬的氣候預測中心在相關技術及預報服務應用產品的開發皆引領全球，職藉由獲得交通部出國專題研究計畫機會，選擇前往美國氣候預測中心(CPC)進行熱帶季內振盪監測預報技術研發，並在研究工作之外也安排參與該中心的例行預報討論會、訓練課程、研討會，及了解相關監測預報產品，特別是觀察學習基於科技前沿的氣候服務新產品。

專題研究主要成果有：(1)提出合適於東亞區氣候應用的 MJO 監測預報指標，(2)藉由研究提出 MJO 影響東亞氣候的有利類型及解釋 MJO 影響的途徑，及(3)了解氣候模式對 MJO 及關連天氣的預報能力。透過本次單位業務學習，了解到 CPC 的 2 項與次季節預報有關的預報服務產品，分別為 CPC 實驗性第 3~4 週預報，及 CPC 全球熱帶危險災害與助益預報產品(Global Tropics Hazards and Benefits, GTH)。此行更深刻認識到目前國際致力加強次季節預報能力所做的努力，我國也需積極面向次季節預報及應用服務的挑戰，建議強化重視一週以上展期天氣預報技術與服務產品的開發，以因應變遷氣候下對早期預警的需求。在 MJO 熱帶季內振盪監測預報作業上，建議除了使用目前慣用的指標外，可考慮也採用本次研習所發展的新指標。另，建議中央氣象局可發展對東半球亞澳季風區的熱帶危險災害與助益預報技術，藉由參與 CPC GTH 的次季節預報服務產品發展，並在既有的中央氣象局 TC Tracker 基礎上與美國氣候作業單位加強持續合作。

目 次

摘 要	2
目 次	3
一、 目的.....	4
二、 過程.....	5
三、 心得與建議.....	30
四、 參考文獻.....	32
附錄 1：英文縮寫名稱對照表	
附錄 2：參加美國氣候診斷預測研討會論文報告內容	

一、目的

台灣位於副熱帶區，天氣的變化同時受到熱帶與中高緯度大氣環流的影響。目前數值天氣預報模式在多年的發展下已經能夠對一個星期以內的天氣變化有很好的掌握，但是對於一個星期以上的展期或長期天氣預報，則仍需持續改進模式並開發大氣的低頻可預報度資訊。其中熱帶一種伴隨有大範圍對流活動的大氣季內低頻波動，稱為 MJO(Madden Julian Oscillation)季內振盪，即是一種可被利用的預報資訊。MJO 季內振盪最活躍的區域在印度洋至西太平洋區，台灣正處於此熱帶系統直接激發的副熱帶環流影響下。同時，因為熱帶大範圍對流活動所形成的熱源也可能透過大氣不穩定動力機制而間接對中高緯激發擾動波，造成西風帶南北移動及強弱變化，並改變東亞區中高緯大氣的高、低壓配置，進而影響局部地區的氣溫冷暖及降雨多寡。

MJO 季內振盪在大氣海洋系統裡是一個影響力可擴及全球的波動現象，目前全世界各國氣象預報作業單位都非常重視這個周期大約為 30~60 天的熱帶大尺度擾動，其中美國國家環境預測中心所屬的氣候預測中心在相關技術及預報服務應用產品的開發皆引領全球。職藉由獲得 105 年度交通部出國專題研究計畫機會，選擇前往美國氣候預測中心研習熱帶季內尺度波動與中高緯大氣環流的交互作用，其中將特別研究海氣季內振盪與台灣氣溫、降雨變化的相關性及其可能影響途徑，並進一步探討如何擷取數值模式中的季內振盪預測資訊以加強 2 週天氣預報應用。期間也觀察該單位基於科技前沿所發展的氣候預報新產品，學習次季節預報作業技術。

二、過程

在研究熱帶季內振盪監測預報技術的目的下，職選擇美國國家氣象局(NWS)轄下國家環境預測中心(National Centers for Environment Prediction,縮寫為 NCEP)所屬的氣候預測中心(CPC)為進行專題研究的場所。行前藉由在該單位服務的楊錫鏗博士幫忙聯繫，完成取得 CPC 主管首長 Director David DeWitt 的同意及正式邀請函，並且獲得該單位氣候模式分析科學家 Dr. Wanqiu Wang 同意共同進行研究並給予指導。

職赴美地點為美國東部馬里蘭州大學公園市(College Park City)。NWS 所隸屬的美國國家海洋暨大氣總署(NOAA)在馬里蘭大學校園附近的研究園區有一棟於 2012 年才新建完成的綜合大樓，其命名為 NOAA Center for Weather and Climate Prediction(NCWCP)，在這裡有上千位的氣象學家、科學家、資料管理專家為了提供全美甚至全球的天氣、氣候及水文預報而努力。集合在此辦公的單位有美國國家氣象局的幾個重要環境預測中心，包含氣候預測中心(CPC)、天氣預報中心(WPC)、海洋預報中心(OPC)、環境模擬中心(EMC)及 NCEP 作業控管中心(NCO)；另外還有美國國家環境衛星、數據及資訊服務中心(NESDIS)的部分單位，以及 NOAA 海洋大氣研究辦公室(OAR)。

職於 105 年 6 月 1 日自台北起程並抵達美國馬里蘭州，11 月 30 日返台，在半年赴美期間，除了 10 月初前往緬因州參加由 CPC 主辦為期 4 天的「氣候診斷與預報研討會」發表階段性研究成果之外，其餘時間皆在 NCWPC 大樓工作，並無安排其他行程。此行任務雖以進行特定專業性研究為主，但職基於在國內所參與業務需要，選擇研究地點為美國氣候預測作業單位，在研究工作之外也安排參與該中心的例行預報討論會、訓練課程及研討會，並了解相關監測預報產品。以下將就「專業性主題研究」與「單位業務學習」兩方面分項說明工作過程。

(一) 專業性主題研究 --熱帶季內振盪(MJO)監測預報技術研發

氣象預報基於科學技術，對於現時天氣往後演變情勢的預報能力與是否存在物理參考依據密切關連。對於氣象預報，一般民眾最常聽到的應該是今明天氣及未來一週預報。基於流體力學與能量守恆的物理，並在取得大氣初始狀況的條件下，現在的天氣預報數值模式已經可以透過數理計算做出未來大約一週以內短中期天氣的有效預測。氣象預報還有對

於一個月以上、以月或季為單元的長期預報(或稱為短期氣候預報)，其預報的關鍵物理基礎則建立於大氣海洋及陸地環境系統的交互作用及低頻緩慢變化，而以此發展的氣候預報動力模式就是月季長期預報所依賴的主要預報工具。

在 WMO 多年傳統的定義下，還有一種氣象預報稱為展期天氣預報(Extended-range weather forecasting)，被界定在預報超過 10 至大約 30 天的時段，通常預報方式會以旬或週的平均氣象表現來呈現。相近於展期天氣預報範圍，近年有另一個更熱門的預報類別稱為次季節預報(subseasonal forecast)，預報時間是指週以上至數週或大約 1 個多月的季節內尺度，而熱帶季內振盪(MJO)正是支持次季節科學預報最重要的物理基礎之一，不管是天氣預報數值模式或是氣候預報模式都以能正確模擬及預測 MJO 使得提供展期天氣預報的服務為努力目標。職在此進行的研究主要是在強化辨識 MJO 的方法，並探討 MJO 對東亞及台灣地區的影響途徑以能使更清楚的描述 MJO 與雨量變化的關係，初步成果於 10 月初在 CPC 研討會發表，其後在 10 月及 11 月的最後的 2 個月並使用 NCEP CFS 模式資料了解對 MJO 的預報能力並驗證研究想法。

1、什麼是 MJO

大氣海洋系統有許多不同時空尺度的波動或擾動現象，通常空間尺度大的波動，活動存在及變化的時間尺度也大。例如影響可達半年以上並擴及全球範圍的 ENSO 就是大尺度的海氣現象，而像是影響局地區域的海陸風、地形雨就屬於小尺度。MJO 是發源於熱帶的全球尺度海氣耦合現象，是一種以季節內時間尺度帶動熱帶大氣環流及水汽分布向東移行的波動現象，與影響每日氣象變化的天氣系統相比，可以持續存在 1~2 個月的 MJO 算是較緩慢的變化，因此可提供第 2 週以上展期天氣的預報資訊。

MJO (Madden and Julia Oscillation)的名稱來自發現的科學家，1970 年代初期 Dr. Roland Madden 和 Dr. Paul Julian 在研究熱帶風場及氣壓場的變化時發現了這個熱帶的季內振盪現象。由於這個波動的變化周期大約是 30 到 60 天，因此也被稱做熱帶 30 到 60 天振盪，或是熱帶季內振盪(TISO)，這個波動是在季節內尺度下熱帶最主要的氣候模態。過去幾十年來科學家們從理論上及現象上嘗試清楚說明 MJO 波動，不過 MJO 包含動力及熱力多尺度的議題，牽涉到複雜的海陸氣的交互作用，現今動力模式對 MJO 預報能力雖已有進展，但仍存在很大的挑戰空間。為了增加對 MJO 的了解及改善預報，國際間也有大

型合作計畫，例如 2011 年的 DYNAMO (The Dynamics of the Madden-Julian Oscillation) 觀測實驗，另外近 2 年的 YMC (Years of the Maritime Continent) 計畫，MJO 也是一個重要的探討主題。

MJO 季內振盪在大氣海洋系統裡是一個影響力可擴及全球的波動現象，已有許多研究及分析報告說明 MJO 波動與許多大氣海洋變化現象的關連，包含聖嬰現象的演化、南北半球的季風系統及各洋域的熱帶氣旋活動，同時，MJO 除了在熱帶產生明顯的的周期性乾濕變化外，也可能引發中高緯度強降水事件。MJO 可影響中長期天氣(1 至 3 個星期)帶來危險災害或助益，甚至對社會經濟造成衝擊。目前全世界各國氣象預報作業單位都非常重視這個周期大約為 30~60 天的熱帶大尺度擾動。要能應用 MJO 的資訊，除了在監測方面要能判斷 MJO 的形成與移動，仍需了解 MJO 如何影響我們關心的區域。另外，各類氣象預報依賴數值動力模式，所以了解模式對 MJO 的掌握能力也是氣象業務的重點工作。

2、怎麼看 MJO

MJO 是大範圍熱帶深對流結合低緯度氣流變化的移行現象，變化的型態可以表現在熱帶降水、雲量、風場、氣壓場、海溫等氣象觀察要素。MJO 活動最明顯的區域是印度洋至西太平洋的暖海溫區域，這塊海域存在有利熱帶深對流發展的較好機會。描述 MJO 的方式一般有 2 個角度，一為強度，另一為相位。強度表示波動的振幅大小，例如熱帶深對流的強弱程度。至於相位則可用來描述波動的峰谷變化，從熱帶深對流來看，可分為「對流加強期」及「對流抑制期」2 個簡單相位。過去幾十年來許多研究 MJO 的科學家也在研究過程討論著描述 MJO 的客觀方法，目前公認最被研究者及預報作業單位一致採用的是 MJO RMM index (Wheeler and Hendon, 2004)，由於 MJO 的向東移行似乎可傳播整個緯圈，此指標將相位改為用來描述波動移行的經向位置，其將全球經度分為 8 個方位，以「對流加強期」為代表，用 8 個相位數字分類說明在 MJO 波動影響下有利於「對流加強期」的位置。例如，當 RMM index 相位為 2 時，表示有利對流加強的位置為印度洋，隨著對流東移，相位數字隨之增加，當 RMM index 相位轉至 4 或 5 時，有利對流加強的位置已來到海洋大陸附近，當 RMM index 相位變化至 6 或 7 時，有利對流加強的位置進到西太平洋，到相位 8 時，則對流進一步東移到中太平洋。等回到相位 1 時，有利對流加強的位置回到印度洋區偏西位置。MJO 活動現象並非天天一直存在，一般而言其顯著表現的方式是在印度洋有強

對流發展並東移，也就是 RMM index 相位為 phase2 或 3 的時間，研究顯示 MJO 處於此相位階段時，往後時間的預報能力相對較高。

MJO RMM index 是監測 MJO 的最主要指標，包含其發源國家澳洲氣象局、美國氣象局等都在服務官網有例行的監測資訊。許多探討 MJO 對全球各地氣候衝擊影響的研究也利用 MJO RMM index 指標來進行數據分析。我們台灣中央氣象局也在 MJO RMM index 於 2004 年推出後，開始應用此指標進行 MJO 的監測，並進行 MJO 各相位下與台灣氣溫、雨量分布變化的統計分析、MJO 相位與南海夏季風肇始日期的統計、及 MJO 各相位下與颱風活動期的統計等分析。過去 10 多年 MJO RMM index 被廣泛利用，也幫助了氣候監測與對於 MJO 可能影響的了解。不過，也是在多年的應用後，近幾年有一些對於指標應用的討論，提出了一些指標的缺點及修改的想法。

MJO 是熱帶最主要的變化現象，基於其形成的物理，存在一種對流與環流的耦合現象，也就是表示在對流與風場有一致性的系統變化。RMM index 使用可以表示對流的 OLR 資料、以及代表高低層環流的 850 百帕緯流風場(U850)和 200 百帕緯流風場(U200)，成功證明可用主成份分析方法所得的前 2 個主導模態來描述 MJO 的行為，而這 2 個主成份在每一個資料時間點對於所使用 3 個關鍵變數(OLR,U850,U200)的投射數值即可建構出 RMM index。雖然 RMM index 已被證明具有描述 MJO 的代表性，不過後來的研究發現控制 MJO 指數的 3 個關鍵變數可能表現並不一，其權重貢獻的差異可能影響對 MJO 事件的認定。在 RMM index 計算方法的設計上，由於是包含整個緯圈的範圍，可代表熱帶深對流活動情形的 OLR 關鍵變數主要的強弱變動較侷限在印度洋至西太平洋區，而風場的強弱變動則較不受地理上的侷限。因此可能使利用 RMM 指標所判定的 MJO 事件偏向強調風場動力上的貢獻，而低估了熱帶深對流活動的貢獻。

在改善的研究方面，Liu 等人(2016)提出一個修正的 RMM index(Rev. RMM)，其核心目標是強迫提升 OLR 的貢獻。由於求得 RMM index 的過程，在進行主成分分析之前需處理 3 個關鍵變數 OLR, U850, U200 的資料結合，其中會有一個資料常態化的處理，Liu 等人(2016)提出可在此常態化步驟修改影響係數以提升被低估的 OLR 貢獻。對於 3 個變數 OLR, U850, U200 在常態化使用的係數，他們依測試結果提出改為分別以 2, 1, 1 經驗值來代替原先從資料所計算出的平均標準差值 15.3 Wm^{-2} , 1.8 ms^{-1} , 及 4.9 ms^{-1} 。Liu 等人(2016)

發表的論文報告分別由統計特性及個案說明經修正後的 RMM index 可以正確辨認一般 MJO 事件，也能改進由於低估熱帶深對流活動而影響判斷 MJO 活動起始的問題。

職在此主題研究下，第一個重點工作是探討 MJO 指標代表性的問題，希望就台灣或東亞區域的應用目的來找出更合宜的 MJO 指標，以幫助本地氣候的監測及預報。職在先前的研究工作已有初步結果顯示在同一個 RMM 相位下，熱帶對流分布仍可能有明顯差異，職進一步比對與台灣降水變化的關係，發現這種差異可能使 MJO 對台灣的影響變成反相，顯示在討論 MJO 對於區域氣候的影響及預報資訊應用，熱帶對流分布的細節可能必需被重視。職根據原來 RMM index 設計上較不能正確掌握印度洋至西太平洋區熱帶對流分布細節的問題進行改善，包含強調季節差異性、強調緯向變化、強調對流活躍區。並且在求取前 2 個主導模態的統計方法上，改為參考 Chang 等人(2005) 使用 SVD 抽取 MJO 的想法，完成一項新的 MJO 指標--SVD 法。為了證明 SVD 新指標的合理性，職進行了一項比對工作，評比對象為原來的 RMM index，經修正的 Rev. RMM index，以及另一套可當基準的純對流指標(OLR_only)(Matthews, 2008)，4 個指標的空間結構結果顯示可被分為 2 個類型，職所新製的 SVD 指標接近於修正的 RMM index，也接近於純對流指標，而原來的 RMM index 則明顯與另 3 組有較大差異(圖 1)。圖中可見原來的 RMM index 強調單峰結構，而包含 SVD 的另外 3 組則比較表現出對流乾、溼區的成對現象。由於有純對流指標的加入比對，可幫助說明這是資料中對流的真實特徵，因此職認為 SVD 法不僅可成功表現對流分布特徵，亦能以客觀方式做出由經驗法所得修正 RMM index 的類似結果，值得持續發展完善做法。

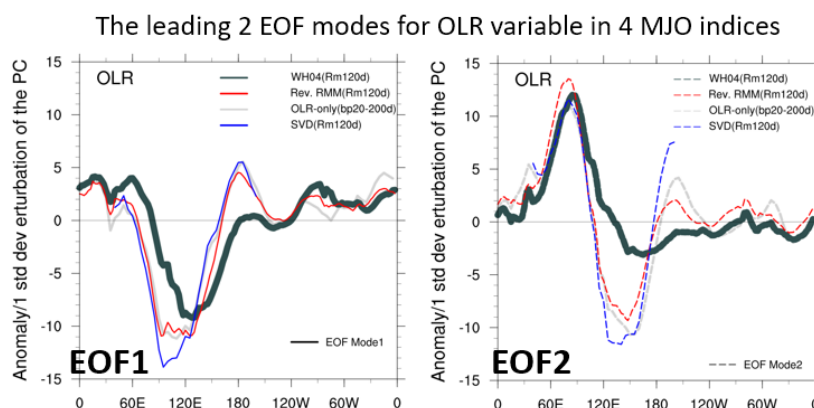


圖 1、本研究所使用 4 個 MJO 指標在 OLR 變數的的空間結構比較圖。其中粗黑線為 WH04 RMM index，藍色線為本研究使用 SVD 方法所新制的 MJO index。

3、MJO 與東亞氣候的關係

在 MJO RMM index 於 2004 年推出後，為了解 MJO 對台灣所關心氣候的影響，職曾利用此指標進行了 3 項工作，包含 MJO 各相位下與台灣氣溫、雨量的分布變化統計分析、MJO 相位與南海夏季風肇始日期的統計、及 MJO 各相位下與台灣鄰近海域(110°E-140°E、5°N-25°N)颱風活動期的統計等分析。初步結果顯示，MJO 的相位變化確實與台灣的氣溫與雨量變化存在顯著的統計關係，而且依不同季節而有差異，例如，對於春季而言，RMM 相位 3, 4 時，台灣偏溼機會高；梅雨季時，則在 RMM 相位 5, 6 時，台灣偏溼機會高(圖 2)。在南海夏季風肇始日期方面，多年的分析顯示以 RMM 相位 6 時有最高的出現機會，此統計關係可協助梅雨期對季節性西南暖溼氣流建立的監測與預報應用。另外，在對於台灣鄰近海域颱風活動的分析結果顯示，MJO 的相位在進入 5-8 時有較多的 Tropical storm days，在相位 1-4 則較少。清楚表示了 MJO 相位的變化確實可影響颱風活動(圖 3)。

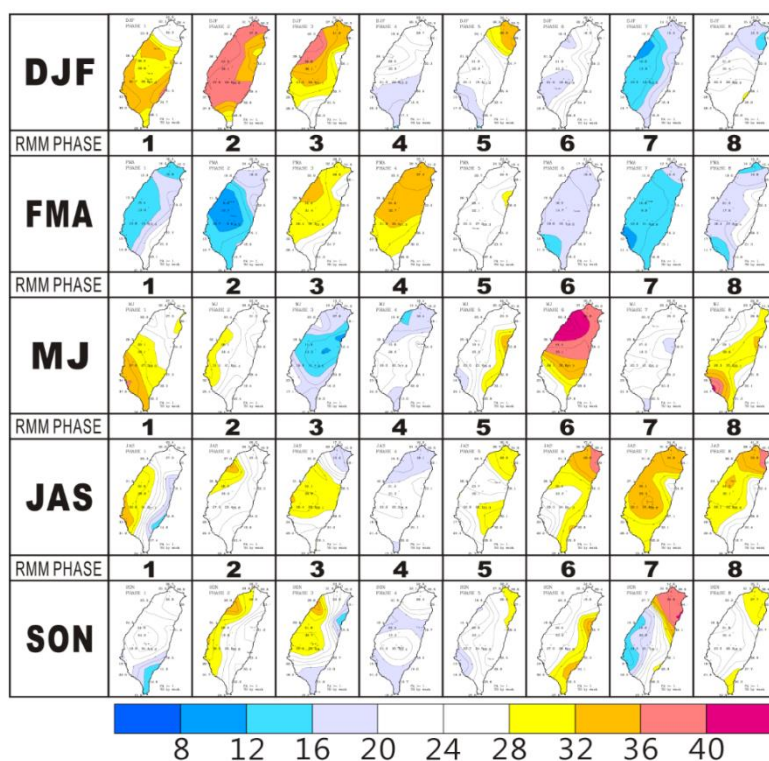


圖 2、在 MJO RMM index 1-8 相位下，台灣各分季多雨機率統計分析圖。其中紅色系表示多雨機會高，藍色系表示多雨機率小。

Tropical Storm days of selected area in the 8 phase of MJO
(Phase amplitude ≥ 1.0)

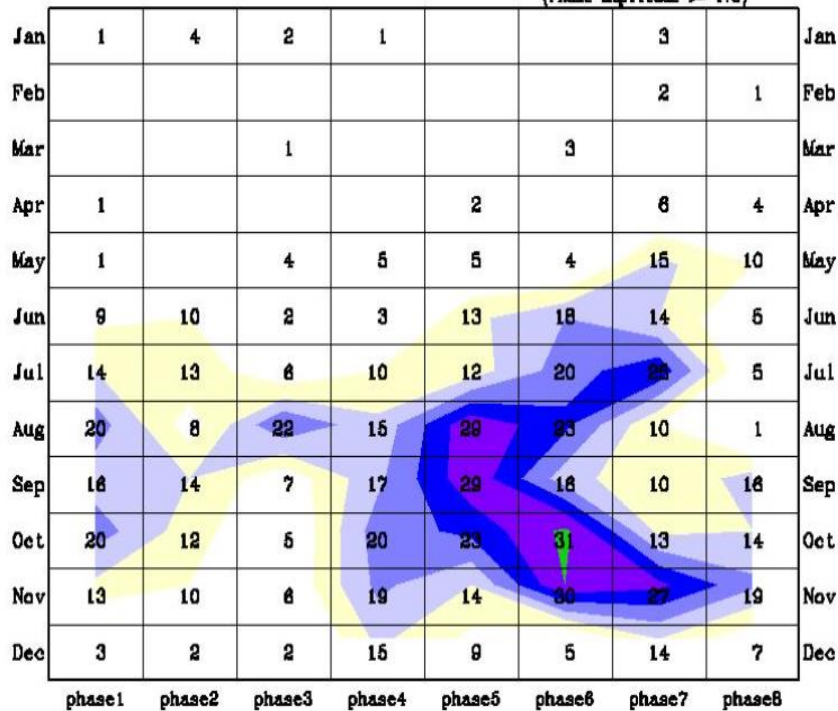


圖 3、在 MJO RMM index 1-8 相位下，各分月台灣鄰近海域颱風活動日數統計分析圖。

過去十多年國際上也陸續有學者分析了東亞包含台灣、大陸、日本、韓國等地區的氣候受 MJO 影響的情形，強化說明了 MJO 的相位變化與東亞氣溫雨量變化的關係，主要的結論大致確認在冬季時當 MJO 相位 3 或 4 時，也就是對流活躍區處於印度洋區時，東亞一帶有利降水，並有南來氣流，而 MJO 的對流活躍區向東移至太平洋區時，東亞一帶不利降水，此時氣流偏向北風，氣溫也傾向偏冷。這些結果析幾乎都是使用 RMM index 所進行的統計分析。由於統計乃基於 MJO 的定義，如果對於 MJO 的定義有一定的差異範圍，也可能會影響分析結果。職希望更深入探討 MJO 對東亞氣候的影響，幫助正確應用可來自 MJO 的預報資訊，一方面利用新的 SVD 指標進行 MJO 相位與東亞冬季降水的分析，同時並與其他指標進行比對，藉由差異特徵以幫助研判問題，另一方面則嘗試了解 MJO 的影響途徑，藉由了解物理過程以幫助正確的資訊應用。

為了分析 MJO 與東亞降水變化的關係，需要取得可分析此區域的降水資料。由於 CPC 正是發展各種氣候監測資料的重要單位，職也利用在此研習機會與製作降水分析格點資料的 Dr. Pingping Xie 請問相關資料組的資訊，並使用目前可最佳代表降雨的 CMORPH 資料進行雨量分析。CMORPH 雨量分析資料結合了陸面雨量觀測資料及衛星降水分析資料，更

好的代表了整體性的降水空間分布。另外，OLR 是氣候分析所慣用的熱帶對流監測資料，職在 CPC 也取得其最新產製的 0.25 度高解析 OLR 資料來進行研究，此組新的 OLR 資料由於有加入新的技術並更仔細地處理資料檢核問題，被認為可在資料品質上更優於舊的 OLR 資料組。

職針對冬季期間的 MJO 個案進行相位合成分析，分別比較了由 4 種不同 MJO 定義指標所得出的結果，研究中為了在同一樣本量基準進行相位間的比較，採用了依強弱排序選取固定樣本量的方式進行分析。比較結果顯示，包含 RMM index、修正的 RMM index、純對流指標及新提出 SVD 等 4 種指標皆在大方向反應一致的信號，亦可見 MJO 的影響主要在東亞沿岸一帶經度，其乾溼變化隨相位更替而變化，在對流活躍區處於印度洋區時，東亞一帶有利降水，而 MJO 的對流活躍區向東移至太平洋區時，東亞一帶不利降水。不過，進一步觀察差異性，可見合成圖上的降水信號以 RMM index 定義下的信號為最弱，由 SVD 指標所定義的信號為最強，另 2 個指標則較接近由 SVD 指標的結果(圖 4)。這表示 SVD 指標有可能可以更好的歸納出對東亞具有影響的 MJO 類型，因此使合成分析結果更能有一致性的訊號。在空間分布上可見 RMM index 與其他 3 個指標的不同點之一是熱帶對流的分布情形，以 SVD 指標為代表的這 3 個指標，其所顯示的熱帶對流的分布在印度洋有溼對流時，強調出了在西太平洋的偏乾現象，而 RMM index 則只特別顯現印度洋的溼對流。職經過一些比對過程，使用不同的資料組，皆可見西太平洋乾溼變化對東亞降水的影響。在此分析下，職認為可確認 SVD 指標可更合適於利用在 MJO 的監測與預報應用工作。經過使用新的指標在台灣氣候分析上(圖 5、圖 6)，在相位關係上沒有改變，但在量化的統計關係上則得到提升。新的 SVD 代表的是可取出更貼近真正影響東亞的空間模態，分析的結果暗示在 MJO 的類型中，當印度洋的溼對流發展之前，如果在西太平洋先存在有乾區，則可能使熱帶對東亞的影響更能顯現。為了確認這個想法，就需要從探討 MJO 影響途徑的角度進一步研究。

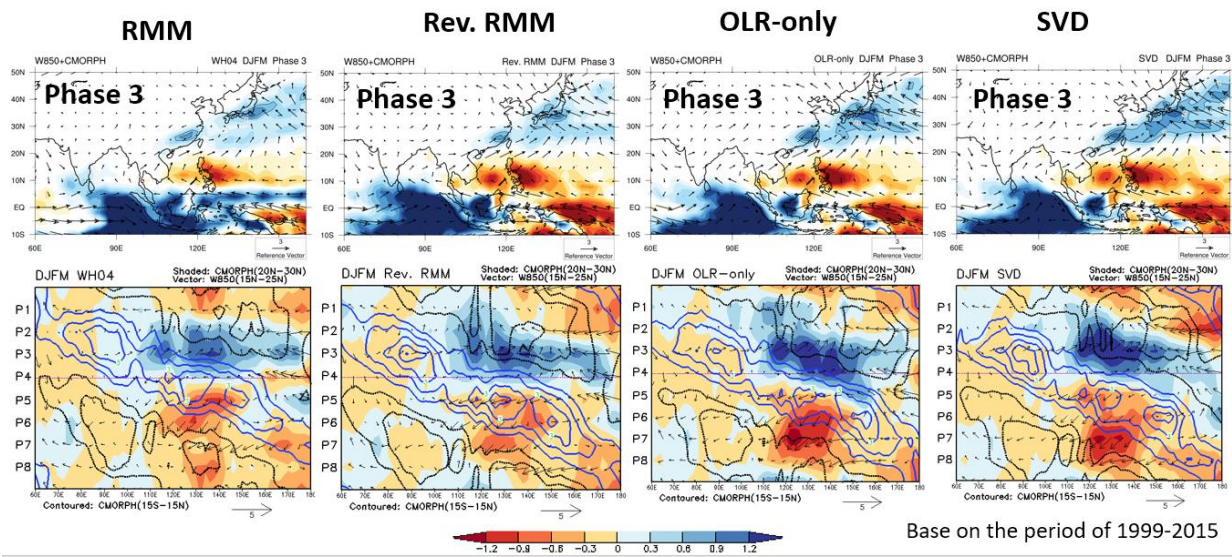


圖 4、本研究所使用 4 個 MJO 指標在 850 百帕低層風場及降水分布的相位合成分析比較圖。上排圖為相位 3 合成分析圖。下排圖為相位-經向變化剖面圖，顏色區為北緯 20 度至 30 度區塊的降水距平，等值線部分為熱帶南北緯 15 度的降水距平，藍色系表示偏溼，紅色系表示偏乾。

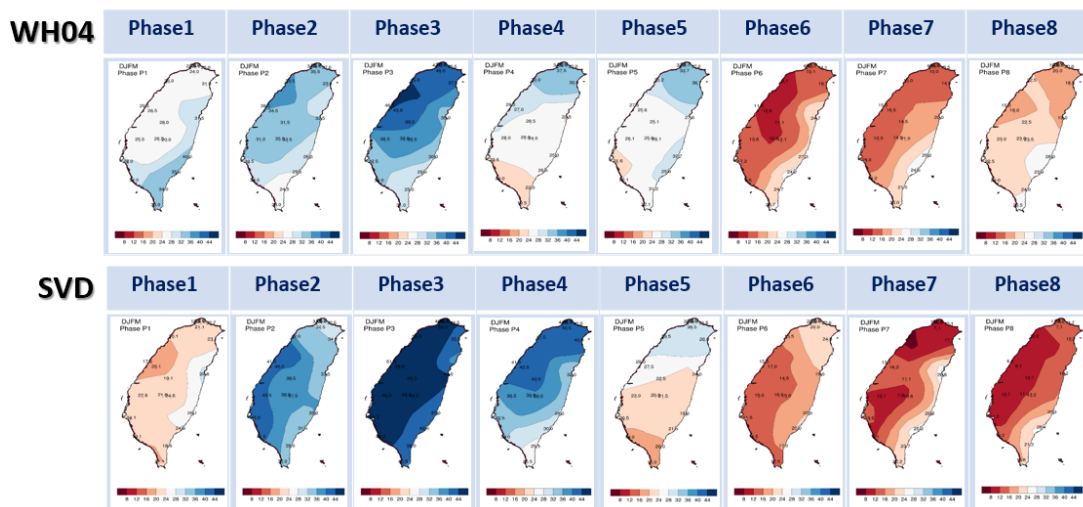


圖 5、使用兩種 MJO 指標進行台灣冬春季(DJFM)多雨機率統計分析的比較圖。上排圖為使用 WH04 RMM index，下排圖為使用 SVD index。其中藍色系表示多雨機會高，紅色系表示多雨機率小。

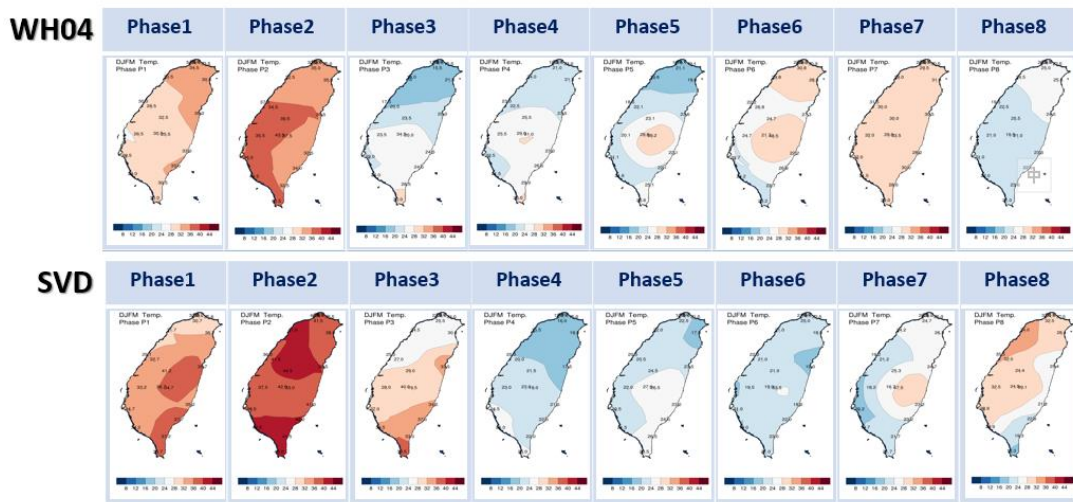


圖 6、使用兩種 MJO 指標進行台灣冬春季(DJFM)高溫機率統計分析的比較圖。上排圖為使用 WHO4 RMM index，下排圖為使用 SVD index。其中紅色系表示偏熱機會高，藍色系表示偏熱機率小。

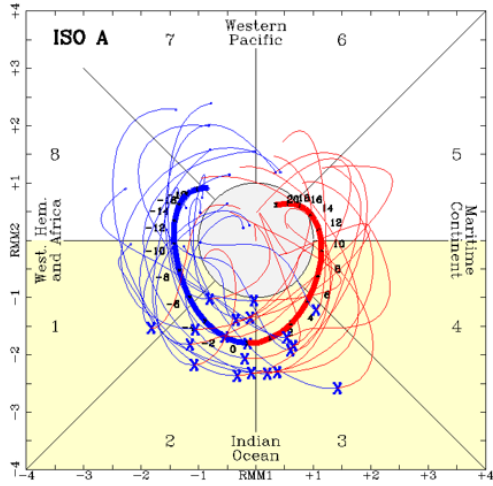
4、MJO 影響途徑的物理機制探討

MJO 是在熱帶東傳的波動，但影響不限於熱帶。MJO 透過在熱帶的活躍對流形成加熱源，可激發一種由凱文波及羅士培波組合而成的波動結構，其中凱文波侷限在熱帶，而羅士培波列則活動於熱源南北方，在加熱源西側有對稱於赤道的高層反氣旋式環流距平，其變動可改變副熱帶噴流的活動，進而影響中緯度天氣變化，可說羅士培波是一種大氣橋，將熱帶的變化傳送至中緯度而形成連動影響。MJO 對東亞降水的影響可見於統計分析結果，在其影響途徑探討方面，多數學者即以 MJO 熱帶熱源激發羅士培波列所引起大尺度環流變化做為主要解釋(Jia et al.,2011, Hung,2014)。這些解釋常以 MJO 在熱帶印度洋區出現活躍溼對流為事件起點，鮮少有延伸至印度洋溼對流發展之前的討論。根據線性理論，MJO 的乾相位亦可透過冷源效果激發羅士培波，其在冷源西側有對稱於赤道的高層氣旋式環流距平，與 MJO 溼相位所激發的羅士培波為反相。職根據前述上節統計分析所突顯乾區重要性，推論 MJO 在印度洋溼對流發展之前，其事前若存在乾相位將激發高層氣旋式環流距平，此氣旋式環流距平移至東亞附近可提供不穩定環境，或許可在東亞天氣受熱帶影響上提供關鍵作用。

經由觀測資料統計分析，可見 MJO 在印度洋處於對流活躍時期，東亞冬春降水傾向偏多。對於此統計關係的應用，上述在探討影響途徑所提出的推論認為仍需配合對 MJO 發

展歷程的觀察，如果在印度洋溼對流發展之前有乾相位存在，則降水機會相對較高。為了驗證此推論，我們將 1998 年以來冬春季的 MJO 個案分成兩類，第一類稱為 ISO-A，即是在印度洋溼對流發展之前有乾相位存在，另一類稱為 ISO-B，為在印度洋溼對流發展之前沒有乾相位存在。分類的方式是使用 MJO 純對流指標(OLR-only)的兩個主成分幫助判別，其第二主成分的空間模態可有效反應印度洋區對流的發展，因此在每次 MJO 事件中定義第二主成分最小極值為事件的第 0 天參考日(day0)。第一主成分的空間模態則可反應東印度洋至海洋大陸區對流的發展，所以參考該主成分的數值來判別事件之前 15 天內是否有乾相位形成。經分類後進行合成分析並繪製 MJO 相位圖(圖 7)及經向位移時間演化圖(圖 8)，可見 ISO-A 類別的 MJO 波動現象在 day0 前後較為清楚，型態上類似 successive MJO。ISO-B 類別的 MJO 波動現象在 day0 之後較為清楚，型態上類似 primary MJO。進一步從空間分布及時間演化圖(圖 9)觀察熱帶變化與東亞副熱帶區環流型態及降水分布，可見雖然 ISO-A 及 ISO-B 兩類別的 MJO 在 day0 都在印度洋有溼對流發展，但只有事前有明顯乾相位的 ISO-A 類別在 day0 及之前至少 5 天內在東亞沿岸有明顯的兩區，也只有 ISO-A 類別可見 200 百帕高度場在事件 day0 前 10 天內有清楚的高層低壓建立於大陸區並隨時間向東移動至沿岸區。此外為了觀察南北位移變化，另截取 110E-120E 的範圍繪製緯向-時間演化圖(圖 10)，可見 ISO-A 類別所反應的副熱帶兩區在 day0 前後延續近 20 天，形成一段多雨期，其前段兩區位置約在北緯 25 度至 30 度附近，後段位置偏南，約在北緯 20 度至 25 度附近。由伴隨的環流看來，兩段雨區的形成機制似乎有所差異，前段兩區有高層低壓配合，可能類似斜壓鋒面型態降雨，後段時間高層低壓已東移出海，此時低緯有加強的南風提供暖溼氣流，在鋒後形成南移的雨區。在此 ISO-A 及 ISO-B 兩類別的比較中，ISO-B 類別在並沒有清楚的副熱帶兩區反應，這個結果支持我們提出 MJO 乾相位具重要性的推論。對於根據 MJO 相位與東亞區域氣候統計關係進行預報應用時，我們的研究結果建議需再考慮 MJO 發展歷程，以東亞冬春降水為例，在印度洋溼對流發展之前有乾相位存在的 MJO(ISO-A 類別)比較能驅動熱帶對副熱帶的影響，當出現此類型的 MJO 將有較高的可預報度。

ISO-A (ncase =19)



ISO-B (ncase =12)

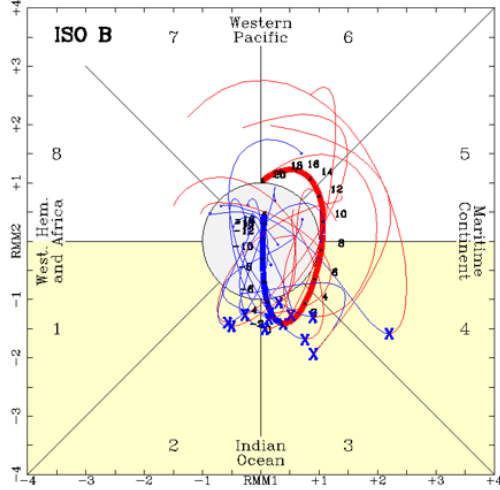


圖 7、本研究所分類 2 類 MJO 事件的相位圖，左圖為 ISO-A 類別，右圖為 ISO-B 類別。粗線為個案合成平均值的相位變化，細線為個別個案，X 型標記為 day0 參考日，藍色線表示 day0 之前的相位軌跡，紅色線為 day0 之後的相位軌跡。

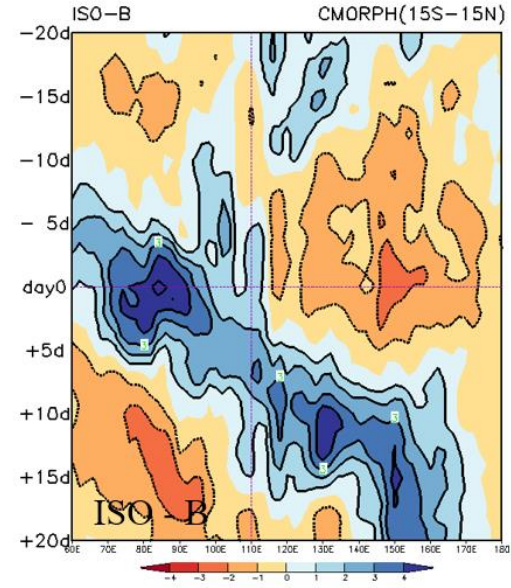
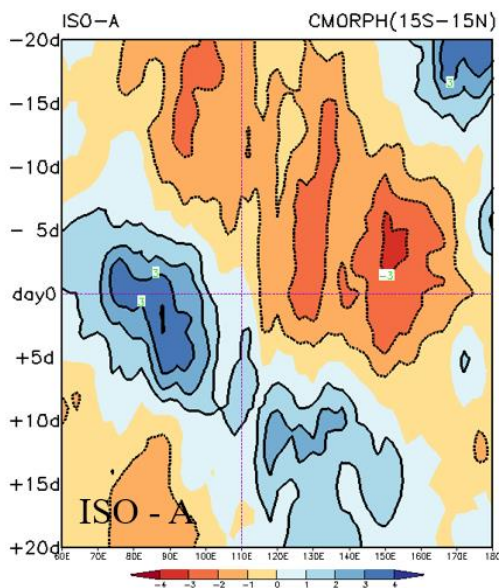


圖 8、本研究所分類 2 類 MJO 事件的經向位移時間演化圖，左圖為 ISO-A 類別，右圖為 ISO-B 類別。顏色區及等值線表示出熱帶南北緯 15 度的降水距平，藍色系表示偏溼，紅色系表示偏乾。

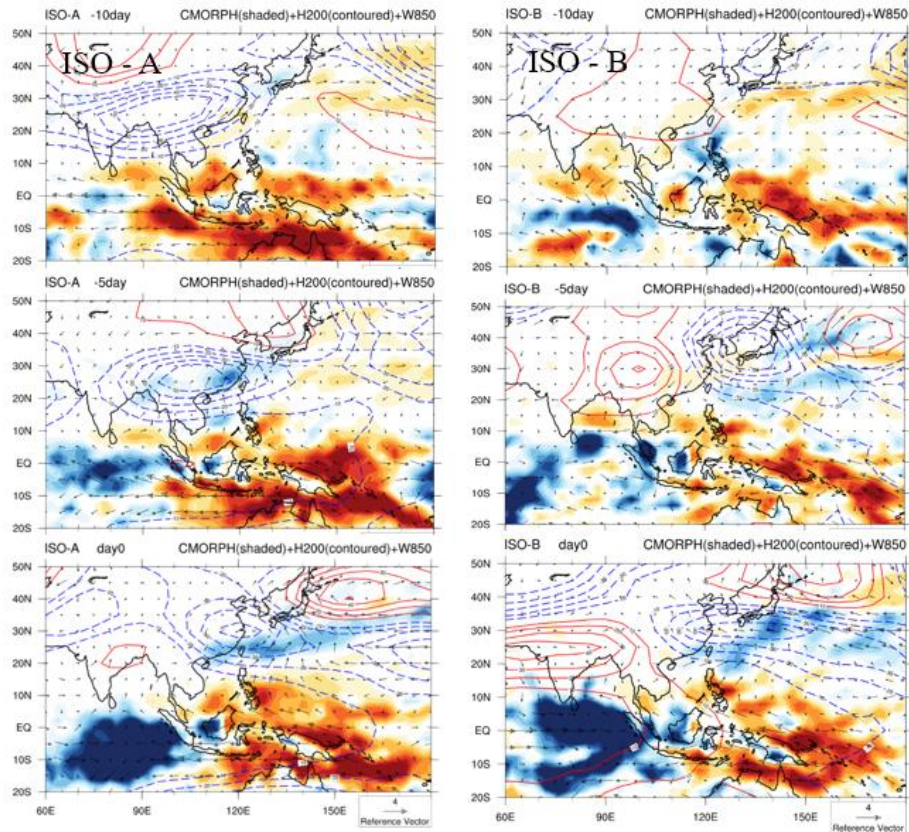


圖 9、本研究所分類 2 類 MJO 事件環流與降水分布合成分析的時間演化圖，由上而下為 day0 前 10 天、day0 前 5 天及 day0 合成圖；左圖為 ISO-A 類別，右圖為 ISO-B 類別。顏色區為降水距平，藍色系表示偏溼，紅色系表示偏乾。等值線為 200 百帕高度距平，藍色系表示負距平，紅色系表示正距平。風標為低層風場距平。

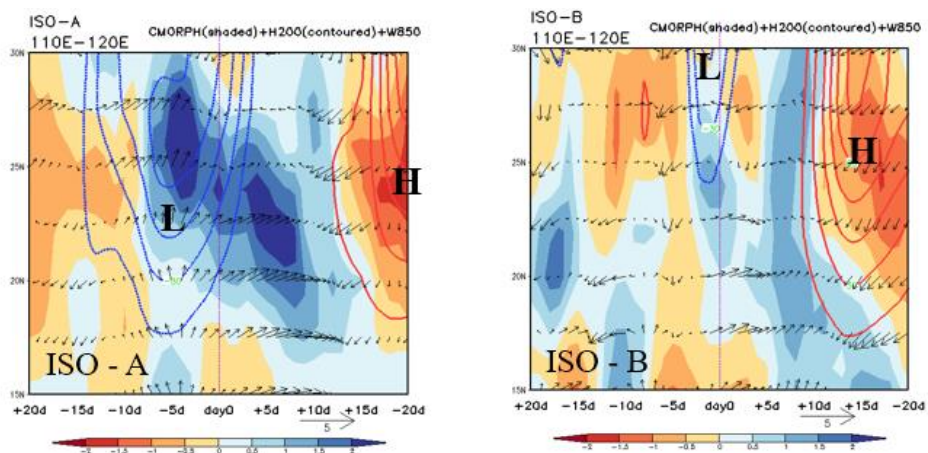


圖 10、本研究所分類 2 類 MJO 事件環流與降水分布合成分析的緯向-時間演化圖，左圖為 ISO-A 類別，右圖為 ISO-B 類別。顏色區為為東經 110 度至 120 度區塊的降水距平，藍色系表示偏溼，紅色系表示偏乾。等值線為 200 百帕高度距平，藍色系表示負距平，紅色系表示正距平。風標為低層風場距平。

5、MJO 可以預報嗎？

如果 MJO 可以帶來具參考性的展期天氣預報資訊，動力模式能不能有效模擬及預測 MJO 就是作業應用最關心的問題了。目前對 MJO 的有效預報可以達幾天？雖然已有許多研究及分析工作，但採用不同的動力模式或不同的評量方式使得結果不盡相同。一個概略性的參考範圍是 10 天到 3、4 週之內。模式對 MJO 的預報技術還跟季節、事件強度及相位有關，一般來說，冬天的預報技術比夏季高，強度較強的事件也比較能被掌握。Wang(2014) 等人使用 MJO 指標評估美國 NCEP CFSV2 氣候模式，指出預報能力可達 20 天。職在完成 MJO 對東亞氣候的影響研究之後，也趁在 CPC 研習機會使用 CFSV2 模式自 1998 年以來的事後預報資料來幫助了解模式對 MJO 的預報能力，同時也藉由這個過程利用模式預報資料檢驗研究獲得結果的推論想法。正式分析前是進行大量的資料下載及計算處理，這部分相當的耗時，也需相當謹慎確認資料的正確性。分析採取的方式是參照對 ISO-A 及 ISO-B 兩類別的個案分類，分別比對及計算模式在 45 天各預報延時的預報技術。分析結果顯示不管是從熱帶觀察 MJO 的東移情形(圖 11)，或是從副熱帶觀察東亞環流型態與兩區的反應(圖 12)，動力模式的預報與觀測分析值的相關度都是以 ISO-A 類別為較高，再次說明型態上類似 successive MJO 的 ISO-A 類別有較好的可預報度。此外，模式預報資料所顯示的副熱帶環流型態與兩區反應也與觀測分析值相似，支持前述研究推論想法。在有效預報延時方面，ISO-A 類別直至 32 天預報延時仍可見觀測分析值所顯示的主要型態，不過在時間上的校驗則顯示有落後預報的情形，這個結果與 Wang(2014)等人的報告一致，他們也提到 MJO 在 CFSV2 模式有移行過慢的現象。CFS 是 NCEP 無縫隙預報在月季尺度所依賴的動力模式，也被期待能掌握季節內尺度的預報資訊。模式應用需要知道過往的校驗資訊，CPC 相當重視這方面的工作。我國中央氣象局亦發展有可提供次季節預報資訊的氣候模式，並有事後預報資料，職此次研習所進行的 MJO 預報能力分析將可同樣用來應用於瞭解本局模式特性。

On tropical eastward propagation (15S-15N)

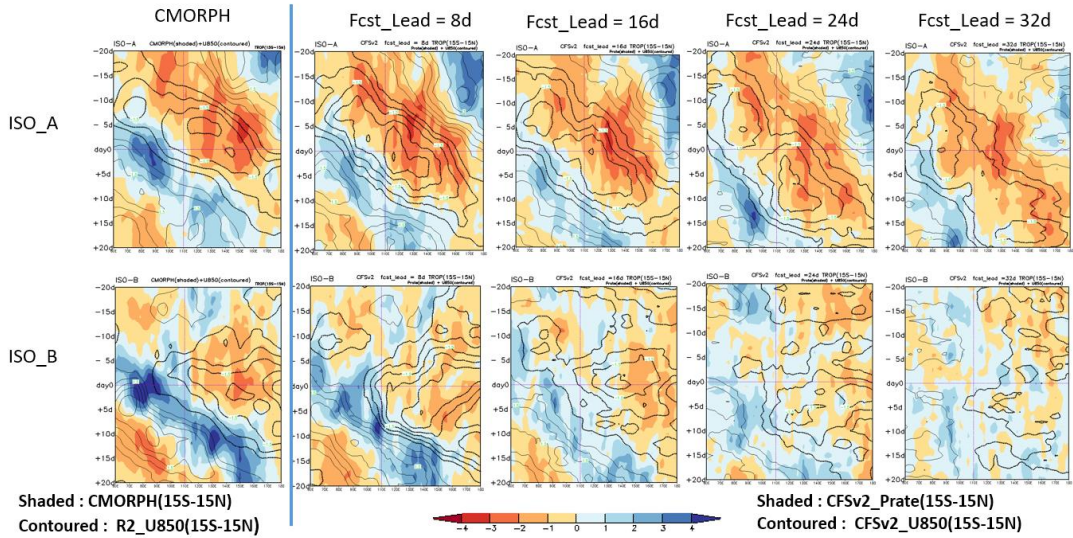


圖 11、NCEP CFSv2 模式對本研究所分類 2 類 MJO 事件的預報與觀測分析比較圖，取熱帶南北緯 15 度區塊比對經向-時間演化。上排圖為 ISO-A 類別，下排圖為 ISO-B 類別。由左而右，第 1 張小圖為觀測分析值，第 2 至 4 張小圖為模式預測值，依次分別為預報延時 8 天、16 天、24 天及 32 天。顏色區為降水距平，藍色系表示偏溼，紅色系表示偏乾。等值線為 850 百帕緯向風距平，粗線表示東風距平，細線表示西風距平。

On subtropical responses (here focus on 110E-120E)

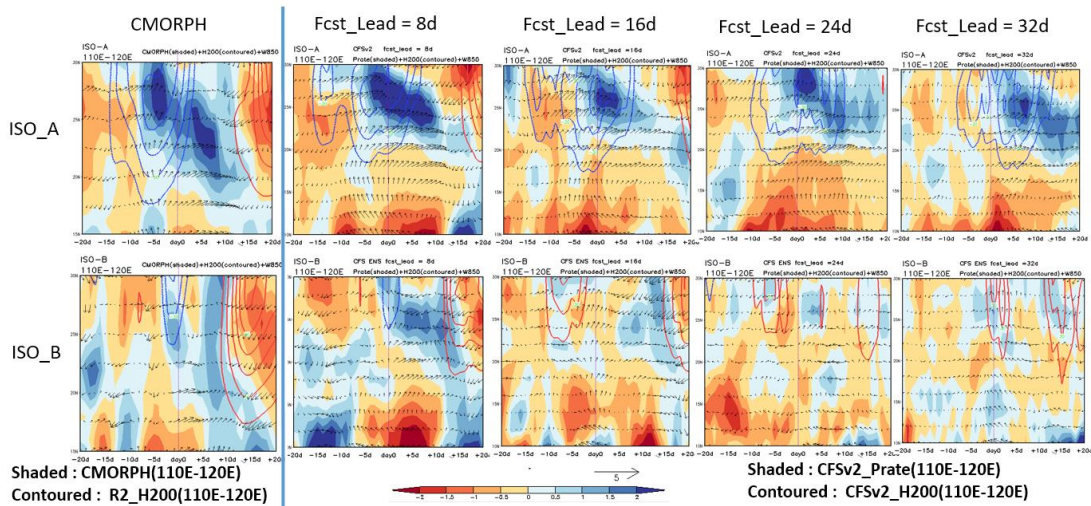


圖 12、同圖 11，但為取東經 110 度至 120 度區塊比對緯向-時間演化。顏色區為降水距平，藍色系表示偏溼，紅色系表示偏乾。等值線為 200 百帕高度距平，藍色系表示負距平，紅色系表示正距平。風標為低層風場距平。

(二) 單位業務學習

NCEP 是美國氣象局最核心的實做單位，他們以提供具科學基礎的環境預測資訊為任務，強調其氣候與天氣預報服務產品在各種時間尺度的應用上皆全面含蓋而沒有縫隙。目前的美國氣象局局長 Dr. Louis W. Uccellini 在擔任 NCEP Director 時，以一張簡圖說明他們的無縫隙預報服務(圖 13)，其中也可清楚看出 NCEP 下 7 個專責作業中心的分工。基本上在超過一個星期以上的天氣與氣候預測服務由 CPC 負責，而其他包含天氣預報中心、海洋預報中心、風暴預報中心、國家颶風中心、航空天氣中心以及太空天氣預報中心等 6 個作業中心所負責的時間尺度則在一個星期以下。

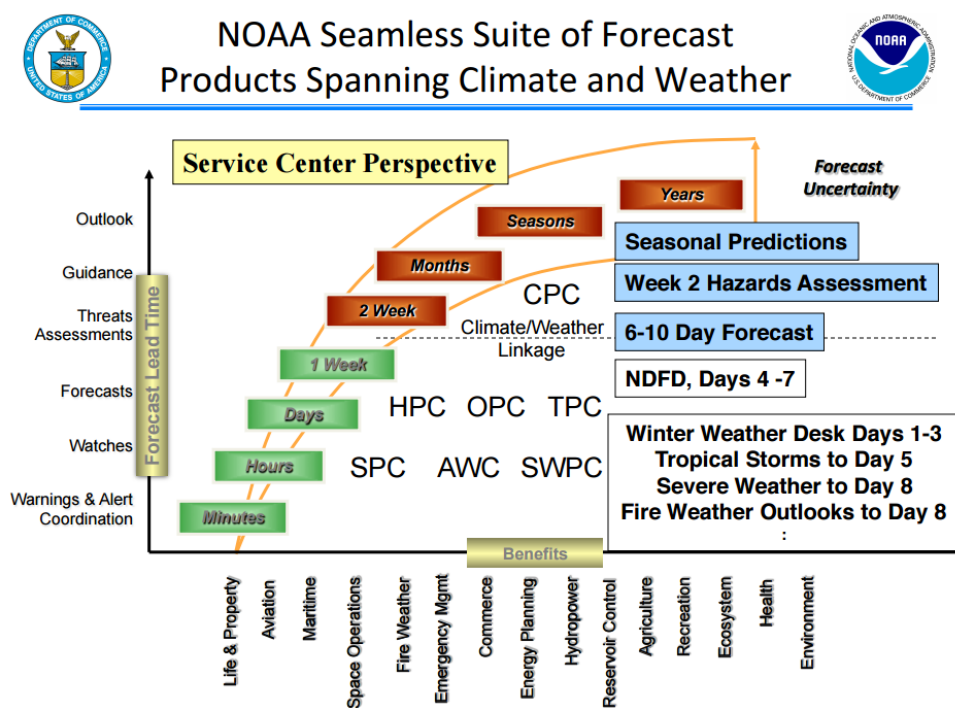


圖 13、美國對於天氣與氣候的無縫隙預報服務及單位分工簡圖。(取自 NCEP 公開簡報)

CPC 負責美國國家長期天氣與氣候的預報業務，主要提供美國境內氣溫、雨量、乾旱、氣象致災等預報資訊，並支援美國各區域中心提供分區服務。然而由於氣候是全球性的環境問題，並且在國際支援及合作下，CPC 的預報業務也涉及全球，包含對世界各分區的氣溫及雨量變化監測並提供模式預測結果、各洋域的熱帶擾動(颱風活動) 監測預報等。CPC 對於全球大氣海洋狀態的監測預報技術發展與服務產品在各國也享有盛名並引領各國學習，其中對於 ENSO 的預測更是全球各作業單位最重要的資訊參考來源。CPC 有今

日世界領導地位的成就或可見於其設立之初的規劃視野及努力，CPC 的前身在 1995 年之前稱為氣候分析中心(CAC)，1979 年 CAC 成立之時，NOAA 請來學養豐富又具實作經驗的科學家 Dr. Eugene M. Rasmusson 來帶領 CAC 中的氣候診斷部門(Diagnostic Branch)。CAC 的任務包含即時性的監測氣候變異狀態，並同時對這些相對於往年的異常進行診斷研究。在這樣的任務下，Dr. Eugene M. Rasmusson 召集了一個工作群來產製所需的資料組及分析工具以使用進行即時的全球氣候監測。這個工作組包含 R.W. Reynolds 負責全球海溫格點分析資料的建置，P.A. Arkin 負責降水及熱帶對流格點分析資料的建置、C.F. Ropelewski 負責降水與氣溫變化的分析，而 Rasmusson 自己也進行 ENSO 演化及影響的分析研究。對於大氣海洋領域的同行而言，上述這些科學家都是大名鼎鼎的人物，其所建立的全球性分析資料到現在都仍常被氣候分析研究者所引用。藉由這個工作組的努力，CAC 發展出可以來監測大氣環流與全球海面溫度變化的氣候診斷資料庫，以及可提供地面氣溫與雨量分析的氣候監測系統。於是在 1982 年時，CAC 就已經可以有一個作業性的 ENSO 監測與診斷系統，當 1982 年至 1983 年發生強烈 ENSO 並造成全世界多處氣候明顯異常之時，CAC 即時性的提供了包含現象的演變及影響衝擊的監測資訊，讓大眾得以認識 ENSO，也使得 CAC 名氣大噪。一直到今天，改名後的 CPC 持續隨新科技進展，不只仍是 ENSO 監測與預測的世界龍頭，對於其他氣候監測預報技術開發及服務推展亦為各國楷模。這其中的成功要素包含監測資料的完善建立，重視科學診斷分析，鼓勵研究及有健全的國內外學研合作機制。

從單位組織來看，CPC 內部有 2 個分組，一為預報作業組(Operational Prediction Branch, OPB)，另一個為監測作業組(Operational Monitoring Branch, OMB)。從主要業務來看，CPC 的工作可大分為三方面：預報、監測、診斷。職在訪問期間藉由旁聽部分會議的機會觀察到兩個分組在三方面業務的共同合作，基本上雖然大部分的預報仍由 OPB 組來執行，但較為著重於專業技術發展的 OMB 組也參加部分預報項目，例如 ENSO 預報；同樣的，雖然 OPB 組主要執行例行性預報作業，但也有承擔部分重要氣候模態的監測與氣候診斷工作，例如 MJO 監測。從執行面來看，CPC 以任務組的形式由兩個組共同執行分項業務，例如負責 ENSO 的預報小組是由 CPC 的 10 個資深人員組成，包含 CPC 副主管 Mike Halpert 及 CPC 兩個作業組的主管，目前小組組長是 OMB 組的 M. L'Heureux。此小組同時負責 ENSO 的監測與診斷，除了在 CPC 官網發布例行性分析報告，在 NOAA ENSO blog 的

服務網站幾乎每個月也都有此小組提供的貼文，以較平易的文字向大眾補充對於 ENSO 的監測預報資訊。

從預報產品面來看，CPC 的主要服務包含月與季的氣溫與雨量預報、月與季的乾旱趨勢預報、颶風活動的季節預報，以及處於第 2 週以上的展期天氣預報，還有致災危害天氣的預報(Hazards outlooks)。對於 1 個月以上的逐月與季節氣候預報，ENSO 現象的狀態與發展趨勢經常是影響的關鍵，非常受到預報員的依賴，而 CPC 也據此設計每個月的例行預報流程，亦即首先在每個月的第 2 個星期完成 ENSO 的預報並對外發布資訊，再來進行月與季的氣溫與雨量預報，以及月與季的乾旱趨勢預報。在 1 個月以上的短期氣候預報指引方面，除了統計經驗模式、歷史類比、個案合成分析以及長期趨勢分析之外，非常重視動力模式產出結果的指引，並且著重在多模式的綜合運用，以及預報校驗的資訊。

回頭來看本章前段所提的 NOAA 無縫隙預報服務，雖然 CPC 負責週以上尺度的預報，但是在一個月以下的展期天氣預報目前正式的服務產品只有 6~10 天及 8~14 天兩類。為彌補此縫隙，CPC 近年已投入重要比例資源希望發展第 3~4 週的預報，也已有初步進展，因此自 2015 年 9 月起也將現階段的實驗性預報產品放置於在官網，供外界參考並收集意見。第 3~4 週的預報可說是 CPC 目前的發展重點工作，這個時間尺度在氣候領域屬於被稱為次季節的範圍，也就是小於季節的尺度，這是目前在氣象上最困難預報的時段。另外，CPC 在一個月以下次季節範圍內還有一個全球熱帶致災危害天氣的預報產品，稱為 Global Tropics Hazards and Benefits Outlook(GTH)，每星期二對外發布未來第一週及第二週全球各洋域形成颶風的潛勢、週雨量顯著乾溼區以及週平均溫度顯著乾溼區的分布預報。職此次赴美進行的是有關 MJO 的監測預報技術，而 MJO 正是 GTH 與第 3~4 週預報的重要參考資訊之一，因此職趁此行在 CPC 訪問，也特別關注此兩項業務的執行，並參與例行預報會議。以下報告將進一步介紹對此兩項業務的了解及觀察。

1、CPC 實驗性第 3~4 週預報

次季節或季節內尺度的氣象研究與預報技術已進行多年，包含理論建立、資料分析及模式發展與應用。美國國家科學研究委員會在 2010 年發布的季節內至年際尺度氣候預報與可預報度科學評估報告中就整理了氣候預報的挑戰並提出建議方向，可見掌握對次季節的預報能力一直是氣象人員持續追求的目標。在 2014 年 9 月美國歐巴馬總統在一場聯

合國氣候高峰會的談話中，宣告要強化早期預警以面對氣候變遷的可能衝擊，其中特別指示要 NOAA 致力於 15 到 30 天的極端天氣預報。這個宣示立即促進了 CPC 對第 3~4 週天氣的預報發展工作。經過 1 年的準備，於 CPC 於 2015 年 9 月起已將第 3~4 週初步實驗性預報產品放置於在官網供外界參考(圖 14)。

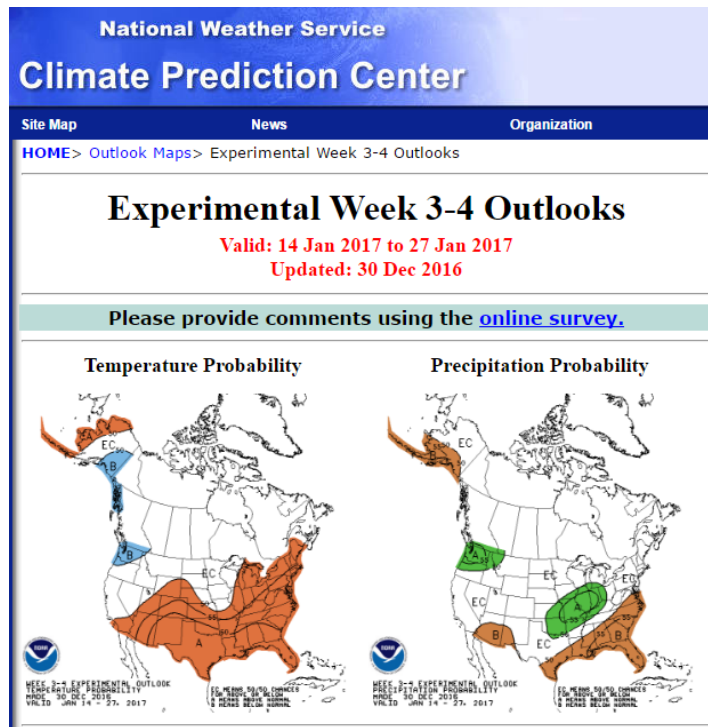


圖 14、美國氣候預報中心 CPC 網站所示之實驗性第 3~4 週預報圖型產品。

在 CPC 服務官網首頁表列了主要預報服務產品的整集表，其中第一項可見 6~10 天及 8~14 天的氣溫與雨量預報，接下來就是 CPC 實驗性第 3~4 週預報，其他則還有月與季的預報以及致災危害天氣的預報。在氣象預報中，大眾所熟知的一個星期以內的預報被稱為短、中期天氣預報，平日例行預報內容包含逐日高低溫變化具體數值、降雨機率高低及天氣陰晴型態等等。在第二週以上較為展期或長期的天氣預報方式，由於逐日變化可預報度的降低，則會以一個平均可能的預報數值下再輔以不確定性範圍來表現逐日趨勢，以試圖完整呈現可掌握的預報資訊。一般而言常見愈往預報的後段時間，不確定性範圍愈大。除了逐日變化的具體定量預報，氣象預報還有一種型式是與往年同期相比的定性類別描述，例如「比往年同期偏暖或偏冷」。通常對於一週以上這種較長延時的預報時間，因為逐日變化的定量預報精準度下降，就會採用此種類別預報型式，改以週、旬平均或月、季

平均為預報單元，分析預報氣象條件在未來的偏向平均趨勢。由於短、中期的逐日天氣預報直接影響民生，現時氣象科技對其又有很好的預報能力，所以是各國氣象預報作業單位最重視的焦點。而在長期天氣方面則以月、季的預報為主，對於這種距離現時時間較久的預報，在氣象科學上是可以藉由了解大氣海洋的低頻緩變情形，透過物理動力模式得知未來幾個月的可能趨勢，因此可說也有一些預報能力，例如聖嬰現象的形成即可用來推斷大氣環流及大範圍水汽分布在未來幾個月的位置偏移情形，進而提供局部地區長期天氣的可預報資訊。至於第二週至第四週這種季內尺度的預報則是現今氣象科學的挑戰，在各國也只有少數擁有數值模式發展與應用的作業單位得以在具有科學基礎的支持下推行，例如日本、美國、中國。藉由充分運用國際模式及自行研發，我們台灣目前也有對第 2 週及 1~4 週平均的滾動預報，不過季內尺度預報是大家共同的難題，這需要一方面從物理基礎找出可預報度的來源，二方面又需能擁有可依賴的動力模式可正確模擬及預報大氣海洋的關鍵控制物理模態及其相互之間的消長作用，此外又有模式應用技術及局部區域氣候複雜度的種種問題，想要有所突破，是需要投入相當的努力。在週平均類別預報下，一般而言，目前的天氣數值動力模式對於第 2 週的大氣變化仍能有一定程度的掌握，這也使美國 6~10 天及 8~14 天的預報校驗成績可以達到有預報技術的水準，並得到大眾的認可。不過對於第 3 至第 4 週的預報，美國直到近年在彌補無縫隙預報服務的迫切需求下，同時也等到動力模式發展更為成熟而有了較可依賴的預報指引，開始以大比重的人力投入技術開發及實驗預報工作，目前這項重要業務的帶領者正是 CPC 預報作業組(OPB)的主管 Jon Gottschalck，其同時是 CPC 過去多年以來發展 MJO 監測與預報的最主要人員。

從預報發布方式來看，目前每週五例行發布的實驗預報將第 3 週及第 4 週合併為一段預報時期，而非分週預報，職從會議中了解這是比較後的決定，分週預報的預報技術似乎不比合併的好。而在例行預報討論會議中，預報員仍然會分別查看分週與合併週的預報輔助工具，以求能對大氣系統的演化有較好的判斷。在預報內容方面，雖然以面對氣候變遷可能引發致災罕見天氣的早期預警需求來看，需要提供極端天氣預報資訊，但是這並不容易一步到位，目前 CPC 提供的初步 3~4 週實驗性產品仍從預報最基本的氣候比較類別開始，亦即預報氣溫是否比往年同期偏暖或偏冷，雨量是否偏乾或偏溼，並以機率值表示出預報強度。值得一提的細節是在 3~4 週的預報類別只有高於正常(Above)或低於正常(Below)兩類，而不似一般氣候預報產品的三類別預報(Above Normal, Near Normal, Below

Normal)。這個決定有部分原因是考慮到希望便於使用者的理解，事實上由於目前仍為實驗階段，CPC 一面持續實驗作業，也經常有許多檢討會議，除了預報技術的討論，也包含校驗方式的檢討，甚至是預報型式的改變思考。據職了解目前的實驗及成效在一定時間內將會有一個綜合評估，以決定是否已可成為正式產品，以及下一階段的進行方向。

CPC 目前預報 3~4 週所使用的預報指引也是職所觀察的重點。對於 6~10 天及 8~14 天的展期天氣預報而言，相當具有預報技術的動力模式是主要的作業工具，CPC 甚至有電腦自動產出的最後預報圖提供預報員進行調修決定。預報員主要的心思會放在分析模式所表現整體性的一致性、模式前後時段預報的連續性、系集模式整體成員的分散度以及是否有特別離群的個別預報，有時再多加考慮一些氣候熱源或環境邊界條件的影響，最後進行綜合判斷。但是對於 3~4 週的預報，因為氣象的混沌問題再加上模式對具有可預報度的主要氣候影響模態預報掌握能力尚未成熟，因此在預報過程就需要發展更多的輔助工具來協助研判。這些工具包含多模式的動力預報，及一些具有物理基礎的統計經驗模式，皆整合在一個內部作業網頁方便預報員操作運用。在動力模式方面，主要使用美國的 CFS、歐洲 ECMWF 以及日本 JMA 等 3 個模式，有時也會參考加拿大的預報模式。CPC 非常重視辨認模式的系統性偏誤及校準，並且很有系統性的進行模式校驗，CPC 內部有一組由計畫約聘的人員協助這些工作。在統計預報指引方面，有多變量線性迴歸模式、有型態類比 (Constructed Analog)、並有考量 Trend、ENSO 及 MJO 而做出的 Phase model，預報員可在網頁選單上查找目前月份在 ENSO 特定冷暖期以及 MJO 波動的特定相位下美國氣溫與雨量偏異的可能分布及機率。值得學習的是，這些統計工具都有過去的校驗結果同時呈現，提供預報員判斷該統計預報結果的可參考性。在預報討論時，預報員會仔細比較 3 個主要參考動力模式的異同，並且交叉比對偏誤校準前後的差別，過程中會查看與統計模式的一致性，也會考量目前的低頻背景，例如是否有 ENSO 及 MJO 信號存在，然後進行綜合的研判。職從會議中了解目前 3~4 週的雨量預報能力並不佳，氣溫則可以看到一些正值的預報技術得分。預報員對於 3~4 週的預報非常期待動力模式的進展，除了已經在使用的 CFS 氣候模式，美國 GEFS 天氣系集模式也會將預報時間延伸至 30 天以上以供應用，另外也有相關計畫正在推展 MME 多模式系集預報產品在次季節的綜合預報產品。

台灣也有自己的氣候模式及天氣全球模式，目前天氣全球模式並積極改進物理參數化方法及海氣耦合方式，以期能對熱帶降水系統有更好的掌握，提高對主要氣候影響模態

演變的預測能力。現階段本局在第 2 週以上的季節內預報仍多使用國外模式，從中架構作業流程及建立經驗。可期待在未來幾年本局模式更臻成熟，將可提供 2~4 週的季節內預報應用。

2、CPC 全球熱帶危險災害與助益預報產品

全球熱帶危險災害與助益展望(Global Tropics Hazards and Benefits, GTH)是 CPC 在近十年由早先的 MJO 監測工作進而發展出來的服務產品(圖 15)。如前所述，MJO 是主要影響季節內預報的重要氣候影響模態，其對於幾個星期內的熱帶降水分布型態占有非常重要的影響。由於 MJO 有一定程度的可預報性，因此 CPC 發展出 GTH 服務產品來幫助辨識熱帶區潛在的致災危害天氣提供外界對防災或可能助益的運用參考，這讓 CPC 原本對 MJO 的監測作業提升至實際預報應用的層次，同時在此作業應用過程並可促使增進對 MJO 及其影響衝擊的了解。

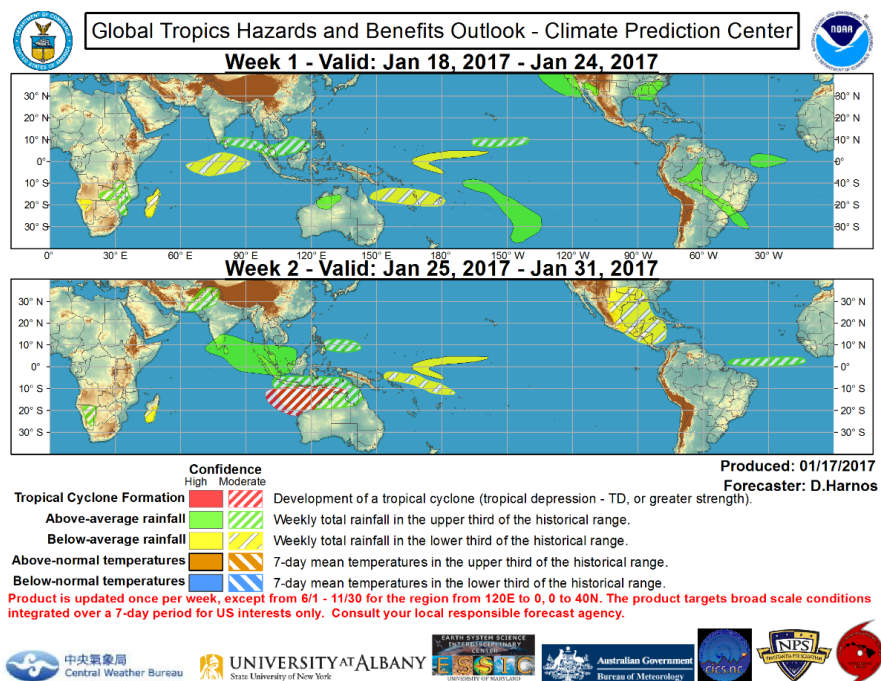


圖 15、美國氣候預報中心的全球熱帶危險災害與助益(GTH)預報圖。

此產品自推出後經過一些變革，目前的發布版本大約定型於 2011 年並延續至今。預報的內容是提供未來第一週與第二週期間熱帶氣旋(颱風)形成的潛勢、大範圍雨區的加強或抑制趨勢預測、以及明顯比氣候偏冷或偏暖區域預測。颱風是最狂暴的致災天氣，同時也可帶來珍貴水源，一向是中低緯度國家非常重視且密切監測的氣象擾動。在 GTH 的例行

會議中，對於各洋域是否有颱風形成的討論也最多，是預報最主要的著重點，其次則為對乾溼區的預報想法，至於冷暖區的預測及討論，以職所旁聽會議的觀察來看則較少聽見，這一方面顯示此產品以熱帶降水分布型態的預測分析為主，另一方面也可能反應現時作業所參考的資訊較少能提供極端氣溫方面的預測訊息。此 GTH 作業為全年實行，於每個星期二進行討論預報會議並發布新一期的展望，其作業順序安排於每星期一的 MJO 例行監測會議之後，使能在掌握對熱帶海洋大氣的現況資訊後，接續進一步應用至對熱帶潛在致災危害天氣的預報。此外，為加強美國主要關心區域的服務，在作業上另安排於每星期五針對北半球太平洋至大西洋區的範圍發布一次更新預報，由於主要著重在熱帶氣旋的預測，此項特別作業只於 6 月至 11 月的颱風活躍季節施行。

專業氣象預報是建立於科學基礎之上，GTH 展望也需要有這樣的物理根據。對於未來 2 週的熱帶天氣預報，MJO 因為是熱帶最主要的季內波動，提供可進行 GTH 預報的主要物理支持。但熱帶在季節內尺度仍有其他不同物理特性的波動也共同影響天氣系統的形成，例如以更快移動速度東移的 Kelvin wave 或是向西移動的赤道羅士培波等，這些波動有各別不同的好發條件，一旦被活躍激發，亦可提供對熱帶風場及水汽分布演變趨勢資訊，CPC 透過學研合作也對這些常見的熱帶波動有例行的監測。此外還有包含 ENSO 這種持續多個月份的低頻海氣現象、大範圍季風系統偏移造成的環流改變、中高緯環流對應於影響熱源的波列結構或阻塞滯留現象等，都是 GTH 仰賴的可預報資訊根據。由此可見進行 GTH 作業需關心 ENSO、季風、MJO、中高緯度交互作用、熱帶擾動，從多重的時間尺度綜合不同的氣候控制因子研判其共同作用，可說是一種跨議題的整合性應用作業，很具挑戰！目前的預報指引工具主要是參考動力模式及統計模式對 MJO 等波動及熱帶降水分布的預測，並參考特定大氣型態的合成分析結果，在客觀指引下進行最後的主觀判斷。

和 CPC 許多對外發布的監測預報產品一樣，GTH 的發布型式除了有一張簡潔的預報圖示之外，並配合有文字報告描述預報員的專業分析與預報想法。一段而言，預報員會在第一段首先說明目前 MJO 波動的活躍情形與相位演變狀況，分析不同模式對 MJO 的預測情形，再進一步討論 ENSO 及其他熱帶波動的狀況及可能影響。熱帶氣旋是最主要的熱帶致災天氣，也是 GTH 的預報重點，因此文字報告中也常在第二段專門描述各洋域熱帶氣旋近況以及模式的預報，並說明對預報信心度的判斷。之後會再接續說明其他雨量乾溼分布及顯著氣溫冷暖區的預報想法及信心度。這樣的文字記錄及對外服務不只可幫助完整資訊的

傳達，同時亦有疏理預報邏輯提供後續校驗、累積經驗並幫助傳承的優點，CPC 在這類專家討論及診斷的記錄不少，值得學習。

前面提到 CPC 的 GTH 展望可說是一種跨議題的整合性應用作業，這不只表現在需對多重時間尺度問題進行綜合研判，也表現在不同分工作業上的資訊整合。對於致災天氣預報，CPC 內部依不同目的設有一些專門作業，例如有美國對於境內的致災天氣預報(U.S. Hazards Outlook)、也有 CPC 協助執行美國對外政策而為非洲、中南美、中亞等部分地區提供的致災天氣監測與預報，這是 CPC 在國際援助下協助「美國國際發展署-饑荒預警系統」(USAID--FEWS) 的例行服務作業，CPC 設有一專案工作組進行此項作業。GTH 展望提供全球熱帶危險災害與助益預報，作業執行上會整合上述專門作業分組的預報結果。另外，在 GTH 例行預報會議上也會透過遠端連線、電話會議方式與全美其他預報單位或學研合作的專家一起進行整體討論，在職旁聽會議過程，時常見到預報員請駐守在夏威夷聯合颱風警報中心的同事提供對太平洋颱風或兩區預報的意見，在紐約州立大學阿爾巴尼分校服務的 MJO 著名專家 Paul E. Roundy 教授及其研究伙伴也常常就他們的學術研究心得提供對資料研判的看法。

GTH 產品表現了多方面的合作，不只是內部作業合作、國內學研合作，也有國際合作，而台灣中央氣象局正是其中一個被認可具有貢獻的合作單位。在 GTH 的圖型產品下方即明列有中央氣象局的局名及局徽。我們台灣在此 GTH 作業所參與的部分在於提供了一項針對全球熱帶氣旋生成潛勢與活動路徑的預報指引，此項指引的核心專業技術乃由目前在淡江大學服務的蔡孝忠教授於當年在中央氣象局服務時所發展，並在預報中心呂國臣副主任推動下完成可提供例行性服務的作業系統，命名為中央氣象局熱帶氣旋追蹤系統(CWB TC Tracker System)，主要針對 NCEP 全球系集預報模式的預報資料進行熱帶氣旋的客觀偵測。此技術的研發成果在 2011 年發表於國際重要期刊 Weather and Forecasting，備受注意，而 CWB TC Tracker 作業系統的預報資訊也有服務專網 (<http://tafislx2.cwb.gov.tw/NcepGens/>) 公開給國際參考。在與 CPC 的合作方面，中央氣象局除了維運服務網站以持續提供基於 NCEP 預報模式所偵測的熱帶氣旋預報資訊外，並另外有安排預報員於每週一研判預報資料繪製全球熱帶氣旋活動預測圖(TC activity outlook)，在 GTH 作業時間之前以電子郵件連同其他參考圖集寄送給 CPC 的 GTH 預報作業團隊參考。CPC 非常重視我們中央氣象局建置的 TC Tracker 偵測系統及相關指

引，在 GTH 預報會議中，非常頻繁的引用我們提供的資訊，當預報員每每說明這是台灣提供的預報指引時，職在旁聽座位總會升起許多感動。由於 CWB TC Tracker 幾乎是預報員在作業上必定參考的資料，因此作業系統的穩定性就非常重要，這一點我們負責的同事做得很不錯，在職於 CPC 訪問的半年期間，只見過一次因為網路服務問題而延遲資料接收的偶發事件，職剛好也有機會幫忙立即回報問題及轉傳資料。在會議之外，職也找機會向幾個預報員請問他們對 CWB TC Tracker 的運用心得，以及對 GTH 的預報經驗。有些預報員較傾向自己參考 CWB TC Tracker 網站上提供的各式原始分析圖再加以分析，有些人則習慣直接看 CWB 預報員提供的研判分析圖(TC activity outlook)。不過由於 GTH 所預報的是熱帶氣旋形成機會(TC formation)，不同於目前 TC activity outlook 中所表示的熱帶氣旋活動區域，在產品定義上可能略有差異。職也將相關可能的問題帶回單位討論。

三、心得與建議

國家需要建立具有氣候韌性的社會，提供早期預警是面對變遷氣候的迫切需求。職此次研習重點為一週以上較長期的天氣預報技術，同時觀察美國在開發展期天氣服務產品上的實際作為，過程中更深刻認識到目前國際致力加強 S2S(subseasonal to seasonal) 預報能力所做的努力。雖然次季節預報仍是難題，我們仍需積極面向次季節預報及應用服務的挑戰，藉由強化動力模式的發展及應用來提升研發能力並帶動國際合作，除了與科技先進國家一起研發預報技術，並可提供所發展預報資訊貢獻國際社群。國際合作的本錢是技術，我國中央氣象局建置有天氣與氣候預報作業系統，有資料分析及模式發展能力，我們確實擁有國際合作的條件，應該珍惜多年發展下的現有成果，並持續努力跟緊國際氣象科研先進技術及預報應用的開創腳步。

最後，根據研習所得提出 3 項建議如下：

1. 建議強化重視一週以上展期天氣預報技術與服務產品的開發，以因應變遷氣候下對早期預警的需求。

美國為了發展第 3~4 週預報，從 2016 起推出一個 5 年期計畫(2016~2020)，以 4 個面向規劃工作，包含產品革新(product innovation)、延長動力模式預報指引時間長度(extending numerical model guidance out in time)、建構模式再預報及重分析的能力(building a reforecast and reanalysis capability)、以及支持對次季節預報的應用研究(supporting applied research in the sub-seasonal forecast range)。美國重視展期天氣預報技術與服務產品革新的作為值得參考。

2. 建議可發展對東半球亞澳季風區的熱帶危險災害與助益預報技術，藉由參與 CPC GTH(Global Tropics Hazards and Benefits)的次季節預報服務產品發展，並在既有的 CWB TC Tracker 基礎上與美國氣候作業單位加強持續合作。GTH 不只可結合致災監測需求，同時可成為操練監測預報技術的平台，可幫助對次季節預報實務能力的建構。我們或可藉由對 GTH 服務產品的共同興趣，與 CPC 一起合作，協助強化東半球的颱風、異常氣溫變化及降水分布等現象的未來兩週預報，並在未來進一步嘗試第 3 及 4 週的展期預報。GTH 可整合熱帶氣候監測、科研成果及模式應用的工作，同時強化亞澳季

風區天氣/氣候影響系統之監測預報服務資訊，帶動國際合作，值得嘗試。具體操作建議為每週例行監測熱帶大氣變化，並繪製東半球亞澳季風區的熱帶危險災害與助益預報圖，過程中分析包含 MJO 等影響氣候的重要模態，並研判模式預報資訊，同時整理遭遇問題以安排透過進一步專題分析深入探討。

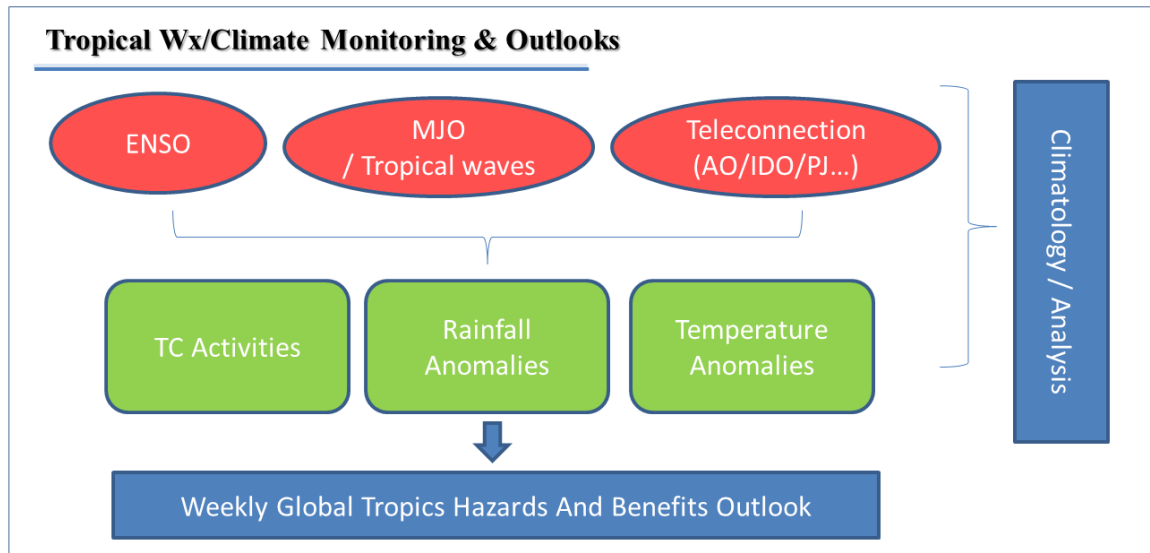


圖 16、東半球亞澳季風區熱帶危險災害與助益預報之操作流程圖。

- 建議在 MJO 熱帶季內振盪監測預報作業上，除了使用國際慣用的 MJO RMM 指標外，可考慮加入採用本次研習使用 SVD 方法所發展的新指標。根據研究結果此項新指標可取出更貼近有利影響東亞氣候的大氣空間模態，可更有效辨識出將影響東亞氣候的 MJO 類型，值得持續發展以求完善。

MJO 熱帶東移波動以冬季較為活躍，本次研究對於 SVD 新指標的應用分析也先著重於冬春季節，根據使用 RMM 與 SVD 兩種指標進行台灣及東亞區冬春季在 MJO 各相位下的降水分析，可見採用 SVD 指標辨識出的 MJO 事件可得到與台灣與東亞附近降水變化有更高的相關性。進一步比較 RMM 與 SVD 兩種 MJO 指標在台灣夏天暖季降水的分析(圖 17)，其結果與應用於冬春季節所見相同，皆反應出採用 SVD 指標確實可比 RMM 指標更能辨識出影響東亞氣候的 MJO 類型。職將持續在此議題進一步分析，以期善用 MJO 可預報資訊於次季節預報應用作業。

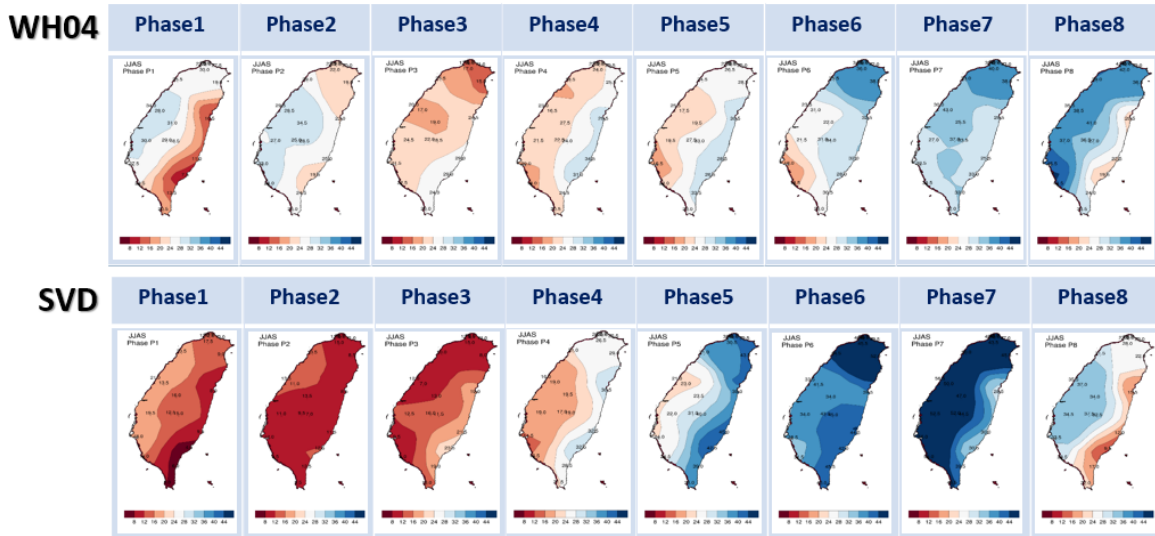


圖 17、使用兩種 MJO 指標進行台灣夏天暖季(JJAS)多雨機率統計分析的比較圖。上排圖為使用 WH04 RMM index，下排圖為使用 SVD index。其中藍色系表示多雨機會高，紅色系表示多雨機率小。

參考文獻

- Chang, C.-P., P. A. Harr, and H.-J. Chen, 2005: Synoptic disturbances over the equatorial South China Sea and western maritime continent during boreal winter. *Mon. Wea. Rev.*, 133, 489 – 503.
- Hung, Chih-wen, Ho-Jiunn Lin, Huang-Hsiung Hsu, 2014: Madden – Julian Oscillation and the winter rainfall in Taiwan. *Journal of Climate* 27:12, 4521-4530.
- Jia, X., L. J. Chen, F. M. Ren, and C. Y. Li, 2011: Impacts of the MJO on winter rainfall and circulation in China. *Adv. Atmos. Sci.*, 28, 521 – 533.
- Liu, P., Q. Zhang, C. Zhang, Y. Zhu, M. Khairoutdinov, H.-M. Kim, C. Schumacher, and M. Zhang, 2016: A revised real-time multivariate MJO index. *Mon. Wea. Rev.*, 144, 627 – 642
- Matthews, A. J., 2008: Primary and successive events in the Madden-Julian oscillation. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 134, 439 – 453.
- Wang, W., M.-P. Hung, S. J. Weaver, A. Kumar, and X. Fu, 2014: MJO prediction in the NCEP Climate Forecast System version 2. *Climate Dyn.*, 42, 2509 – 2520.
- Wheeler, M. C., and H. H. Hendon, 2004: An all-season real-time multivariate MJO index: Development of an index for monitoring and prediction. *Mon. Wea. Rev.*, 132, 1917 – 1932.

附錄 1：英文縮寫名稱對照表

英文縮寫	英文全名	中文名稱
CAC	Climate Analysis Center	氣候分析中心
CFS	Climate Forecast System	氣候預報系統
CMORPH	CPC MORPHing technique	美國氣候預測中心整合衛星反演降雨率資料之變形法技術
CPC	Climate Prediction Center	美國氣候預測中心
CWB	Central Weather Bureau	中央氣象局
ENSO	El Niño and Southern Oscillation	聖嬰現象
GTH	Global Tropics Hazards and Benefits Outlook	全球熱帶危險災害與助益預報
ISO	Intraseasonal Oscillation	季節內振盪
MJO	Madden and Julian oscillation	熱帶季內振盪
NCEP	National Centers for Environment Prediction	美國國家環境預測中心
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration	美國國家海洋暨大氣總署
NWS	National Weather Service	美國國家氣象局
OLR	Outgoing Longwave Radiation	外溢長波輻射
OMB	Operational Monitoring Branch	美國氣候預測中心監測作業組
OPB	Operational Prediction Branch	美國氣候預測中心預報作業組
RMM	Real-time Multivariate MJO Index	即時多變數熱帶季內振盪指數
S2S	Subseasonal to Seasonal	次季節至季節尺度
SVD	Singular Value Decomposition	奇異值分解
TC Tracker	Tropical Cyclone Tracker	熱帶氣旋追蹤系統

附錄 2：參加美國氣候診斷預測研討會論文報告內容

Science and Technology Infusion Climate Bulletin
NOAA's National Weather Service
41th NOAA Annual Climate Diagnostics and Prediction Workshop
Orono, ME, 3-6 October 2016

An analysis of the MJO influence on the rainfall in subtropical coastal areas of East Asia

^{1,2}Yun-Lan Chen, ²Chung-Hsiung Sui, ²Chih-Pei Chang, ³Wanqiu Wang
¹Central Weather Bureau, Taiwan
²National Taiwan University, Taiwan
³Climate Prediction Center, NCEP/NWS/NOAA

1. Introduction

The Madden-Julian Oscillation (MJO) has been found to affect weather and climate over the globe at different time scales, including the tropical cycle, Indian and Australian summer monsoons, North and South American climate, Arctic and North Atlantic Oscillations, and El Niño Southern Oscillation. In this study, we analyze its impact on the rainfall in the subtropical coastal areas of East Asia during northern winter and spring seasons. While previous studies have shown that rainfall over this area is affected by the MJO, locations of the tropical convection that is associated with this influence are not certain. Further, physical processes that link the MJO and the rainfall remain unclear.

Our analysis aims to address the following questions : (1) What is the temporal relationship between evolution of the MJO and the rainfall in the East Asia (EA) subtropical coastal areas; (2) Does such a relationship depend on the use of different MJO indices, and (3) What are the physical processes that relate the MJO and the rainfall variations and, in particular, what is the role of the convection and atmospheric circulation condition in the tropical western Pacific?

2. Data and Approaches

The analysis is based on the NCEP atmospheric reanalysis, outgoing longwave radiation (HIRS OLR, 1979-2015) and satellite rainfall estimation (CPC CMORPH, 1998-2015). We composite rainfall evolution following the tropical MJO phases by 4 MJO indices (Fig. 1): (1) RMM index (Wheeler and Hendon, 2004), which has been shown more dominated by dynamics. (2) Revised RMM index (Liu et al., 2016), which was designed to enhance the contribution from OLR, (3) OLR-only index (Matthews, 2008), a convection-centric index, (4) SVD-based index, an MJO index proposed by Chang et al. (2005) and redesigned in this study to emphasize regional domain and seasonal dependency. According to the results from the composite analysis, two types of MJO events are separated to investigate the impact of the detailed spatial convection pattern and its evolution on East Asia rainfall, and the connection between tropical MJO convection and the subtropical responses.

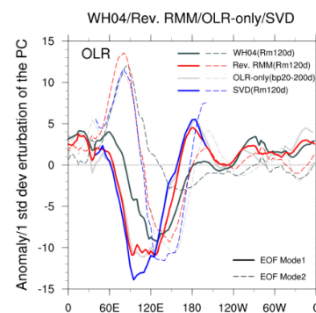


Fig 1 The leading two EOF modes for OLR variable in 4 MJO indices. The comparison shows the revised RMM index and SVD-based index are similar with the OLR-only index, which has two centers of anomaly, while the RMM index more depicts just one center.

Table 1 MJO indices used in this study:
 (1) WH04 RMM index,
 (2) Revised RMM index,
 (3) OLR-only index ,
 (4) SVD-based index

	Ref /related Paper	Season	parameter	Data filter	EOF matrix	Domain longitude	Domain latitude
WH04	W&H_RMM (2004)	All-season	OLR+U8U2	Remove 120d_runningM	C-EOF/ Cov scaled	Global Tropics	1D Ave(15S-15N)
Rev. RMM	P. Liu et al. (2016)	All-season	OLR+U8U2	Remove 120d_runningM	C-EOF/ Rev. scaled	Global Tropics	1D Ave(15S-15N)
OLR-only	Matthews (2008)	DJFM	OLR-only	20-200-day filtered	EOF / Cov	Global Tropics	2D (30S-30N)
SVD	Chang et al. (2005)	DJFM	OLR+U8U2	Remove 120d_runningM	SVD/ Cov scaled	IO - MC-WNP	2D (30S-30N)

3. Results

3.1 Relationship between tropical MJO and East Asian rainfall

Composite of CMORPH data show the rainfall variation in the EA subtropical coastal is modulated by MJO, consistent with previous studies (Jia et al.,2011, Hung,2014). All 4 MJO indices show robust wet/dry flip sign over EA during the MJO cycle. Although the main feature is similar among the 4 MJO indices, rainfall variation over subtropical EA is better captured by OLR-only index and regional SVD-based index (Fig. 2). Taking phase 3 composite value for example, the rainfall variance over subtropical EA(20N-30N, 110E-130E) are 1.46 and 1.54 (mm/hr)² for WH04 and Revised RMM indices, and are 2.63, 2.93 (mm/hr)² for OLR-only and SVD-based indices. Differences in the spatial tropical convection pattern are found between the WH04 index and the other three, which are more convection-centric. The 4 indices all show clear wetness over Indian Ocean(IO) during the MJO phase 3, while only the WH04 index produces wetness over the equatorial west Pacific(WP).

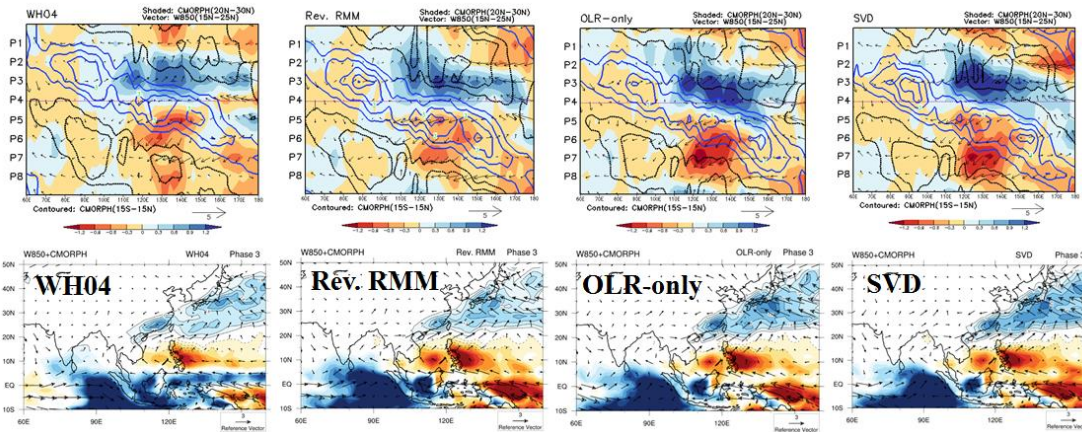


Fig 2 Phase-longitude composite diagram(upper), and 2D composite map for phase3 (lower) for 4 MJO indices, from left to right : (1) WH04 RMM index (2) Revised RMM index (3) OLR-only index (4) SVD-based index.

Composite maps for abnormal conditions of subtropical EA rainfall are also calculated to study its connection with the tropical convection pattern. For the same MJO phase, a dry or wet pattern over EA can exist. One such an example is shown in Fig. 3 for RMM phase 2 which also show some differences in tropical area. This suggests an analysis of more detailed spatial convection pattern is needed to understand the connection between tropical convection and subtropical rainfall.

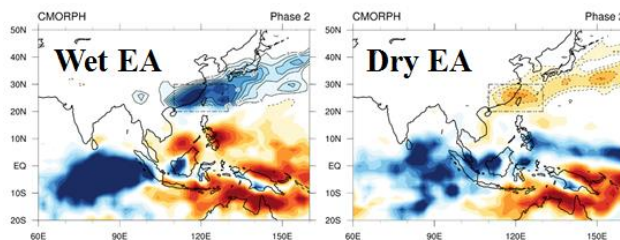


Fig 3 The rainfall composite map for RMM MJO phases 2. (1)Left : the first one-third EA wet cases composite. (2)Right : the first one-third EA dry cases composite.

3.2 Connection between tropical convection and subtropical responses

The fact that the subtropical rainfall variance is better captured by convection-centric MJO indices suggests that detailed tropical convection patterns may be crucial in determining the impact on EA rainfall from the MJO.

We separate MJO events that correspond to strong convection into 2 groups: ISO-A and ISO-B. Group ISO-A is for cases with significant dry condition over Maritime Continent (MC), and ISO-B is for the others. We use OLR-only index for the selection of MJO cases and define the day0 as the time when active convection is over IO. The phase diagram and the time evolution of the tropical convection show the ISO-A type cases correspond to successive MJO events, while ISO-B type cases belong more to primary events (Fig. 4).

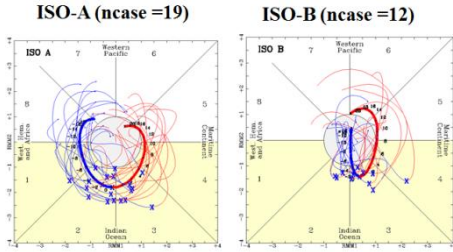


Fig 4 The MJO phase diagram for ISO-A(left) and ISO-B(right).

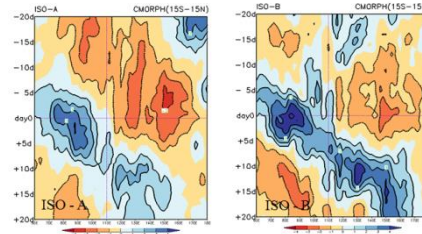


Fig 5 The propagation of tropical convection for ISO-A(left) and ISO-B(right).

Comparison of the evolution of the two MJO types shows the ISO-A type has much stronger wet response over EA than ISO-B. A significant local high-level trough was established before the day0 for ISO-A in association with the evolution of the tropical convection. We speculate that this is the dynamical reason for favoring the EA wetness. Another interesting finding for ISO-A is the southward movement of the EA wetness after the day0, which is in association with the getting-stronger southwest flow near 15N-25N. It looks like the high-level trough and the southwest flow together form a long period of unstable weather and cause rainfall over EA, and they both could be related to the MJO tropical heating and its eastward movement. From the evolution of ISO-A, the high-level trough over EA is after the eastward of cyclonic circulation anomalies, which is consistent with a response of dry phase MJO over IO-MC. The increased southwest flow is a feature frequent seen when a low-level anticyclone sits over Philippines. With a dry phase in advance, the ISO-A type tends to have a low-level anticyclone lingering Philippines area while the tropical convection over IO moves eastward into WP.

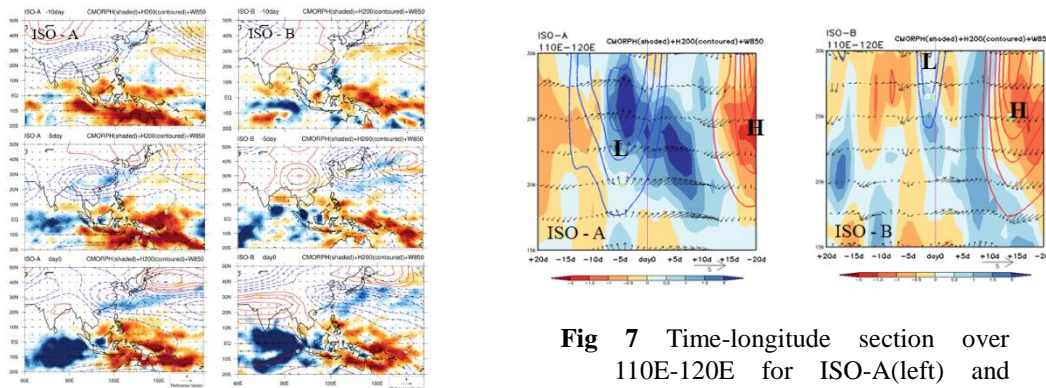


Fig 6 Evolution for ISO-A(left) and ISO-B(right) : 10-day before(Upper), 5-day before(middle), day0(lower).

Fig 7 Time-longitude section over 110E-120E for ISO-A(left) and ISO-B(right).

4. Summary

This study analyzes East Asia rainfall variation related to the MJO during northern winter and spring seasons. The robustness of wet/dry flip sign show EA rainfall variation is clearly modulated by MJO, suggesting that it is a source of the predictability for EA intraseasonal variations. Among the MJO indices, the convection-centric MJO index and reginal SVD MJO index are found to better capture the connection between the MJO and its subtropical rainfall responses. Our results suggest the EA rainfall response depends on the detailed spatial pattern of tropical convection. Development of a high-level trough corresponding to MC dry condition may be a key component for the EA wetness, suggesting the importance of the MC dry phase before the active convection over the IO.

References

- Chang, C.-P., P. A. Harr, and H.-J. Chen, 2005: Synoptic disturbances over the equatorial South China Sea and western maritime continent during boreal winter. *Mon. Wea. Rev.*, 133, 489–503.
- Hung, Chih-wen, Ho-Jiunn Lin, Huang-Hsiung Hsu, 2014: Madden–Julian Oscillation and the winter rainfall in Taiwan. *Journal of Climate* 27:12, 4521–4530.
- Jia, X., L. J. Chen, F. M. Ren, and C. Y. Li, 2011: Impacts of the MJO on winter rainfall and circulation in China. *Adv. Atmos. Sci.*, 28, 521–533
- Liu, P., Q. Zhang, C. Zhang, Y. Zhu, M. Khairoutdinov, H.-M. Kim, C. Schumacher, and M. Zhang, 2016: A revised real-time multivariate MJO index. *Mon. Wea. Rev.*, 144, 627–642
- Matthews, A. J., 2008: Primary and successive events in the Madden-Julian oscillation. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 134, 439–453.
- Wheeler, M. C., and H. H. Hendon, 2004: An all-season real-time multivariate MJO index: Development of an index for monitoring and prediction. *Mon. Wea. Rev.*, 132, 1917–1932.

Correspondence to: Yun-Lan Chen, Central Weather Bureau, Taipei, Taiwan; E-mail: yunlan.chen@cwb.gov.tw