

交通部中央氣象局  
委託研究計畫期末成果報告

中央氣象局高解析度全球預報模式的診斷及物理參數化  
的改進研究(1/2)

計畫類別：氣象    海象    地震

計畫編號：MOTC-CWB-105-M-07

執行期間：105 年 3 月 9 日至 105 年 12 月 31 日

計畫主持人：楊明仁教授

協同主持人：隋中興教授

研究助理：林昌鴻、侯書宇、張惠琪、林宜霖

執行機構：國立臺灣大學大氣資源與災害研究中心

本成果報告包括以下應繳交之附件（或附錄）：

- 赴國外出差或研習心得報告 1 份
- 赴大陸地區出差或研習心得報告 1 份
- 出席國際學術會議心得報告及發表之論文各 1 份

中華民國 105 年 11 月 24 日

政府研究計畫期末報告摘要資料表

計畫中文名稱	中央氣象局高解析度全球預報模式的診斷及物理參數化的改進研究(1/2)		
計畫編號	MOTC-CWB-105-M-07		
主管機關	交通部中央氣象局		
執行機構	國立臺灣大學大氣資源與災害研究中心		
年度	105 年	執行期間	自 105 年 3 月 9 日起至 105 年 12 月 31 日止
本期經費 (單位：千元)	2320 千元		
執行進度	預定(%)	實際(%)	比較(%)
	100%	100%	100%
經費支用	預定(千元)	實際(千元)	支用率(%)
	2320 千元	2320 千元	100%
研究人員	計畫主持人	協同主持人	研究助理
	楊明仁教授	隋中興教授	林昌鴻、侯書宇、 張惠琪、林宜霖
報告頁數	26	使用語言	中文
中英文關鍵詞	MJO (Madden-Julian Oscillation)、RMM 指數 (Real-time Multivariate MJO index; RMM index)、奇異向量(singular vector)		
研究目的	由於熱帶季內震盪 MJO 現象，常會決定南海的西南季風肇始時刻，進而影響臺灣的梅雨季入梅時間；MJO 現象可將赤道地區的水氣由印度洋源區，越過中南半島經過南中國海而傳至臺灣附近，往往提供臺灣地區豪大雨發生的有利環境條件。同時 MJO 現象也會影響臺灣附近的颱風活動，例如 2009 年的莫拉克颱風個案即為一明顯例子。由於美國日本等科學家曾於 2011 年 10 月至 2012 年 3 月期間於印度洋進行 DYNAMO 密集觀測實驗，對於印度洋區域的 MJO 熱帶對流現象有完整密集的衛星、雷達及探空觀測資料。因此本年度 (105)計畫的研究目的，在於系統性評估 CWBGFS 模式對於熱帶季內震盪 MJO 現象的預報能力與其可能的改進建議。		
研究成果	CWBGFS 模式對於 DYNAMO 實驗期間之 MJO 事件的模式預報，相較於 NCEP 再分析資料之緯向風場與 OLR 距平場，		

	<p>CWBGFS 模式對於緯向風場的掌握程度較高，於預報第 15 天內，模式仍能合理地模擬出 MJO 東移、再次增強及極值發生位置的特徵。在 OLR 距平場方面，MJO-1 與 MJO-3 事件在預報第 5 天過後，CWBGFS 模式便無法合理地模擬出 MJO 系統東移的特徵；而 MJO-2 事件則於預報第 10 天後，負值的 OLR 分佈較為零散，且其東移的訊號較不明顯，甚至呈現滯留的情況。物理參數化法之敏感度實驗結果中，顯示將積雲參數化法改為 Tiedtke 方案後，有助於改善 CWBGFS 模式對於 MJO 現象的預報能力。使用奇異向量技術，針對印度洋至太平洋區域加入初始場擾動，於 MJO-2 事件期間，系集成員於印度洋地區呈現對流訊號強度偏弱的情況。而將初始場擾動區域個數增加後，系集成員 MJO 對流訊號發散的效果較為明顯。</p>
<p>具體落實應用情形</p>	<p>本年度研究計畫已完成使用中央氣象局全球模式(CWBGFS)解析度為 T319L60 之作業版以模擬 DYNAMO 實驗期間 (2011/10 - 2012/03 共 6 個月) 的事後模擬(hindcast)控制組 (CTL)實驗(00Z 及 12Z 45 天的預報)，並利用奇異向量(singular vector)技術產生初始條件擾動，進行 20 組成員的系集預報 (ensemble forecast)實驗。本計畫使用 NCEP (National Centers for Environmental Prediction) 再分析資料與 CWBGFS 模式於 DYNAMO 實驗期間之 MJO-1 至 MJO-3 事件的模擬結果，進行模擬比較與差異結果討論。</p>
<p>計畫變更說明</p>	<p>(若有)</p>
<p>落後原因</p>	<p>(若有)</p>
<p>檢討與建議(變更或落後之因應對策)</p>	

# 目錄

一、	前言.....	1
二、	CWBGFS 模擬結果.....	1
三、	MJO 指數.....	6
四、	MJO 中 OLR 與 200 hPa、850 hPa 緯向風場.....	8
五、	RMM 指數的相關係數與均方根誤差.....	12
六、	物理參數化法敏感度實驗.....	13
七、	系集模擬實驗.....	22
八、	參考文獻.....	26

## 一、前言：

本年度研究計畫已完成使用中央氣象局全球模式(CWBGFS) 解析度為 T319L60 之作業版以模擬 DYNAMO 實驗期間 (2011/10 – 2012/03 共 6 個月) 的事後模擬(hindcast)控制組(CTL)實驗(00Z 及 12Z 45 天的預報)，並利用奇異向量(singular vector)技術產生初始條件擾動，進行 20 組成員的系集預報(ensemble forecast)實驗。故在本年度研究計畫期末報告中，為了瞭解 CWBGFS 模式對於熱帶季內震盪(Madden-Julian Oscillation; MJO)系統的掌握能力，我們使用 NCEP 再分析資料與 CWBGFS 模式之模擬結果進行結果比較與差異檢討。另外，我們也進行物理參數化法之敏感度實驗，嘗試找出 CWBGFS 模式適合模擬 MJO 系統的物理參數化方案組合，以改善 CWBGFS 模式對於 MJO 現象的預報能力。

## 二、CWBGFS 模擬結果：

### a. 外溢長波輻射距平：

根據 NCEP 再分析資料的外溢長波輻射 (Outgoing Longwave Radiation; OLR) 之距平再分析資料[圖 1(a)]，顯示在 DYNAMO 實驗期間 MJO-1 事件大約發生於 2011 年 10 月中下旬，於 60°E 附近肇始 (中印度洋地區)，其 OLR 距平值大約為  $-50 \text{ Wm}^{-2}$ ，範圍狹窄。在對流系統東移過程中，當對流接近海洋陸地 (Maritime Continent) 時對流強度逐漸減弱，並於 120°E 附近再次增強。MJO-2 事件期間之對流肇始於 2011 年 11 月中旬，系統大約於非洲地區生成，其 OLR 距平最小值與 MJO-1 事件相同，但負值的 OLR 分佈範圍較廣，並隨時間發展有向外擴散的趨勢。當對流系統到達東印度洋地區後也有強度減弱並再次增強的現象，此與 MJO-1 事件類似，但是對流發展強度較強且範圍較大。而 MJO-3 事件肇始於 2011 年 11 月下旬，大約於東印度洋地區生成，生成位置明顯較前兩個事件偏向東邊；而且對流系統生成後，便於西太平洋地區隨時間逐漸消散，對流發展較不旺盛。

CWBGFS 模式模擬結果[圖 1(b)~(e)]顯示，在 MJO 抑制相位區域有明顯對流過強的情形。在預報第 1、5 天的結果[圖 1(b)、(c)]中，呈現 MJO-1 事件在對流肇始時，OLR 距平最低值與 NCEP 再分析資料相同，但是負值的 OLR 水平範圍較大，且隨著時間發展 OLR 範圍有逐漸擴大的現象。當對流系統到達東印度洋後，CWBGFS 模式合理地模擬出對流系統減弱並再次增強的特徵。其中 CWBGFS 模式預報第 5 天的結果顯示，對流(OLR 距平 $\sim -50 \text{ Wm}^{-2}$ )在東印度洋地區的強度維持時間較長，對流減弱的時間相對較晚。模式預報第 10 與 15 天的結

果顯示[圖 1(d)、(e)]，雖然對流的生成時間和 OLR 距平的最小值與 NCEP 分析場的結果類似，但是預報負值的 OLR 距平分佈較為零散，且沒有明顯東移的特徵，模擬對流系統呈現停滯的情況。

CWBGFS 模式對於 MJO-2 事件期間在預報第 1 與 5 天的結果顯示[圖 1(b)、(c)]，對流系統分佈較為零散，而 NCEP 分析場較為集中，但模擬結果仍有掌握到對流東移、強度減弱與再次增強的現象。模式第 10 與 15 天的預報結果顯示[圖 1(d)、(e)]，隨著預報天數的增加，負值 OLR 距平分佈的零散程度也增加，並且沒有合理地模擬出 MJO 對流東移的特徵，此與 MJO-1 事件時類似。

MJO-3 事件中，於預報第 1 天模式仍可掌握負 OLR 極值位置(約  $80^{\circ}\text{E} \sim 90^{\circ}\text{E}$ )及西向東移動的 MJO 特徵，但預報達第 5 天以上時，對流系統便呈現隨機生成且東移特徵不明顯甚至停滯的現象。

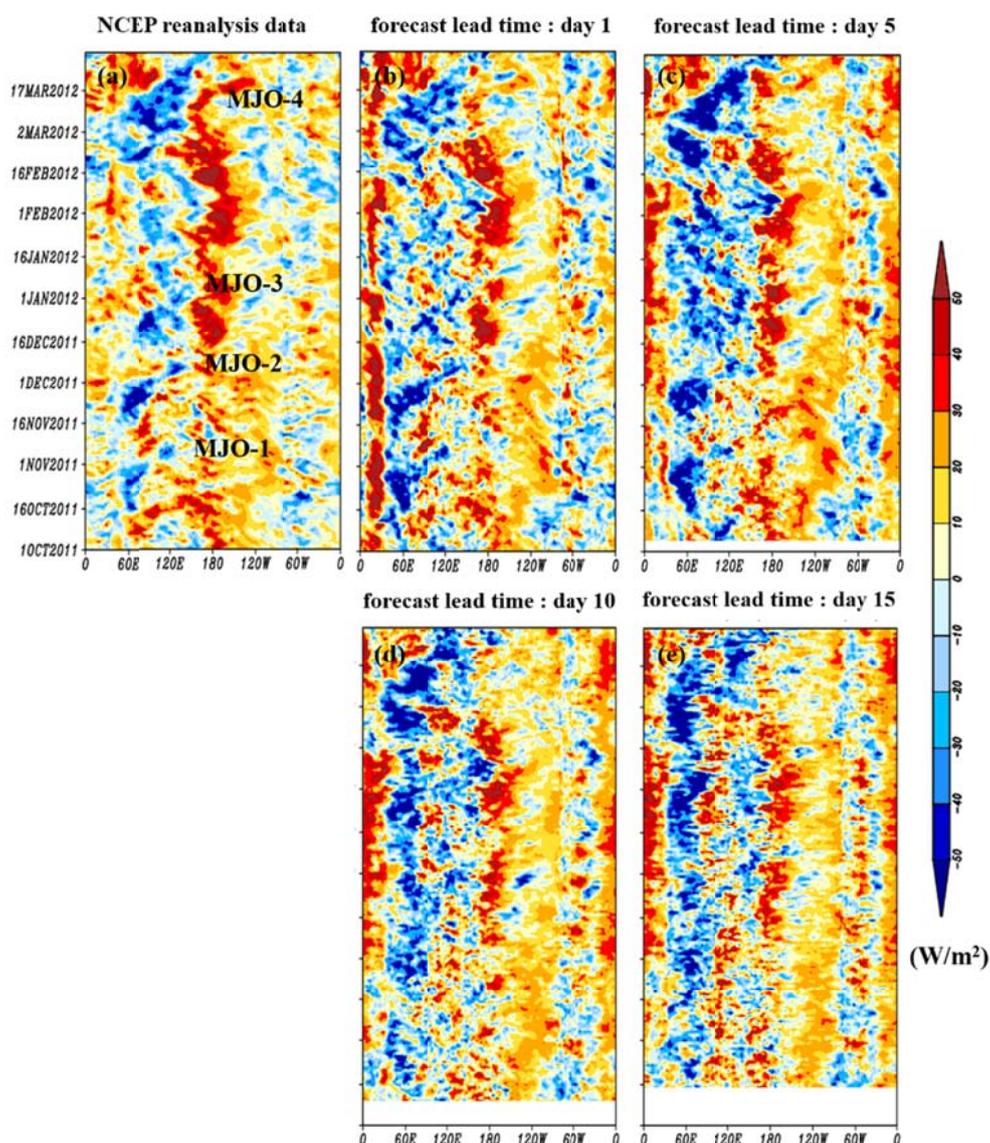


圖 1: 外溢長波輻射( $\text{Wm}^{-2}$ )距平(Outgoing Longwave Radiation; OLR)時序圖，分別為(a)NCEP 再分析場資料與(b)CWBGFS 模式預報第 1 天、(c)第 5 天、(d)第 10 天及(e)第 15 天的結果。

圖 2 為 CWBGFS 模式與 NCEP 分析場於 MJO-1、MJO-2 及 MJO-3 事件期間之 OLR 相關係數與均方根誤差的預報天數時序圖。CWBGFS 模式對於 MJO-1、MJO-2 及 MJO-3 事件於預報第 1 天的相關係數分別為 0.64、0.66 及 0.67。隨著預報天數增加，相關係數降低。於預報第 5 至 6 天時，MJO-1 事件的 OLR 相關係數下降至 0.5 以下，MJO-2 期間則於第 11 天前之相關係數仍可維持在 0.5 以上，而 MJO-3 事件，雖然在預報第 5 天以前的相關係數與 MJO-2 結果一致，但是當預報天數增加，其相關性遞減速度較其他兩個事件快，於預報第 9 至 10 天，相關性下降至 0.5 以下。因此就 OLR 而言，CWBGFS 模式對於 MJO-2 事件的掌握程度較 MJO-1 及 MJO-3 事件為高。均方根誤差(RMSE)也有類似的結果，在預報第 1 至 15 天 MJO-1 事件期間的偏差皆較 MJO-2 事件時為大，而 MJO-3 事件隨預報天數增加，OLR 誤差於預報第 3 天後迅速增加，高於其他兩個事件。

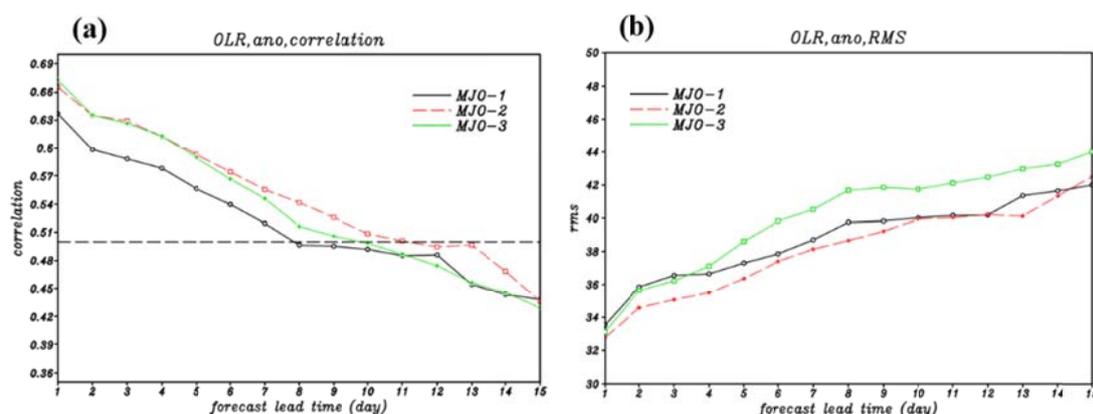


圖 2: NCEP 再分析資料與 CWBGFS 模式模擬的(a)OLR 相關係數與(b)均方根誤差隨預報天數變化之時序圖。

#### b. 降水距平：

在 NCEP 再分析場的降水距平圖中[圖 3(a)]，MJO-1 事件期間降水主要集中在印度洋地區，降水距平最大值大約為 8 mm；當對流系統到達陸地後，降水明顯減少，此與 OLR 場結果類似。MJO-2 事件期間之降雨訊號較 MJO-1 事件時為明顯，強降雨距平(>8mm)的水平範圍也較 MJO-1 事件時分佈為廣，且當對流系統越過陸地後再次增強後造成的降雨也較 MJO-1 事件時多。而 MJO-3 事件之降水距平極值也有達到 8 mm 以上，但其強降雨水平延伸距離較短；當對流系統越過海洋陸地地區後，降水便逐漸減少。

CWBGFS 模式模擬結果呈現於赤道帶地區降水有過多的情形。於 MJO-1 事件期間，模式預報第 1 天的強降水距平區域(>8mm)明顯較 NCEP 再分析場的範圍為大；而且其預報第 5 天的結果顯示，對流生成後，在系統東移的過程中，降水場便迅速減弱，弱降水區域變大。模式預報第 10 與 15 天的結果顯示，其呈現

出大範圍的弱降水，MJO 對流所造成的強降雨帶與 MJO 抑制相位形成的乾燥區域皆不明顯。在 MJO-2 及 MJO-3 事件期間，CWBGFS 模式結果與 MJO-1 事件時類似，於預報第 1 天仍有降雨過強的情形，且經過陸地時降雨減弱的訊號不明顯。隨著預報天數增加，降雨帶東移的特徵逐漸消失。

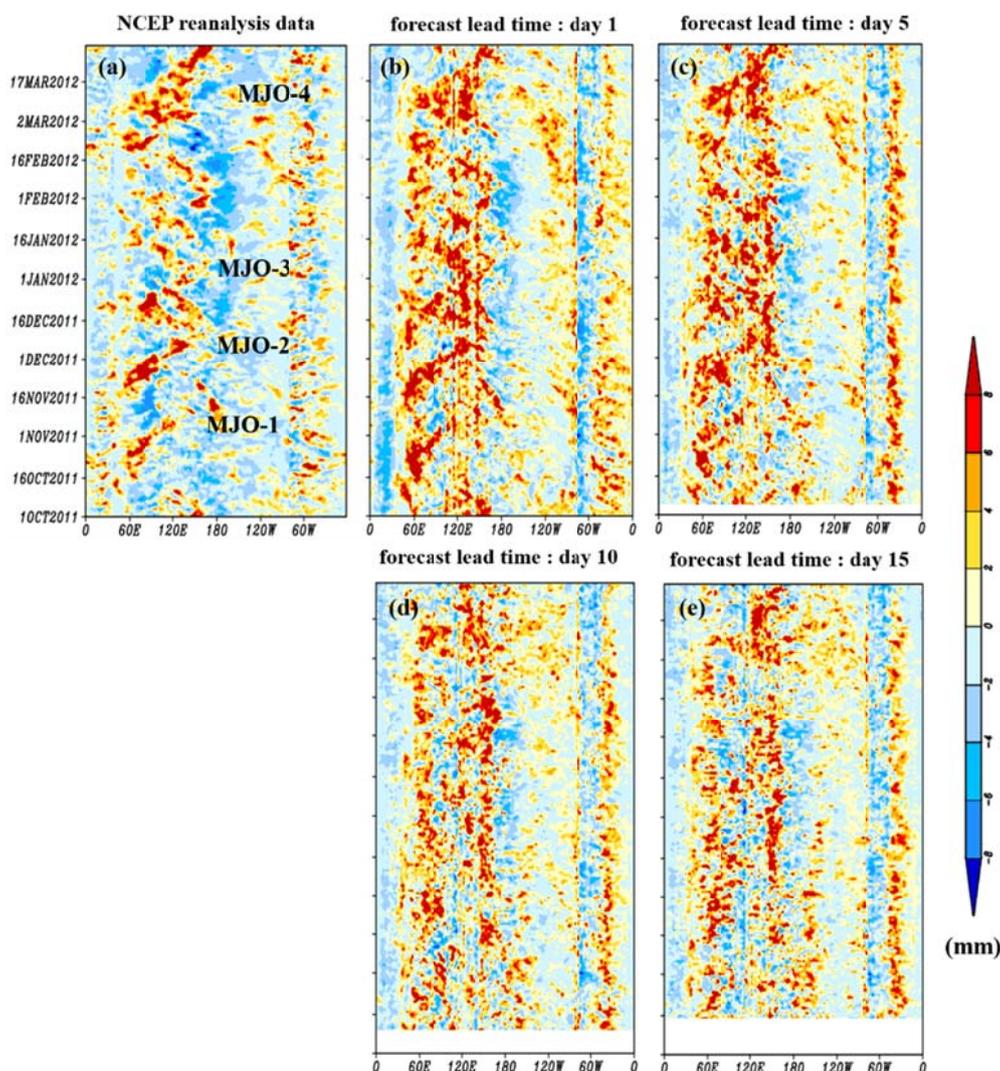


圖 3: 與圖 1 相同，但為降水距平，單位為 mm。

### c. 緯向風場：

在緯向風範圍平均(63°E ~ 83°E、10°S ~ 10°N)的垂直分佈時序圖(圖 4)中，NCEP 再分析資料呈現於 MJO 事件期間低對流層西風增強，而高層轉為東風風場的斜壓大氣結構，並且在 MJO-2 及 MJO-3 事件時，低對流層有較強的西風風場。而每個 MJO 事件之間，顯示高層東風高度下降後，有低層西風風場減弱的特徵。此結果與 Yoneyama et al. (2013) 分析 DYNAMO 實驗期間位於甘島(Gan Island)及 Reville 船舶探空資料的分析結果相同。

CWBGFS 模式的預報場中，模擬緯向風場的分佈與 NCEP 分析場類似，可以合理地模擬出於 MJO 生命週期期間，低層西風增強與高層轉為東風的斜壓大氣結構特徵；但低對流層的西風皆有稍微偏強的現象。而且隨著預報天數增加，低層西風強度增加，且在高層東風高度下降使低層西風減弱的特徵也越來越不明顯。預報到第 10 天至 15 天，CWBGFS 模式模擬結果呈現在 DYNAMO 實驗期間，低對流層皆為西風而高對流層皆為東風的結構，MJO 對流系統造成風場結構改變的特徵消失。

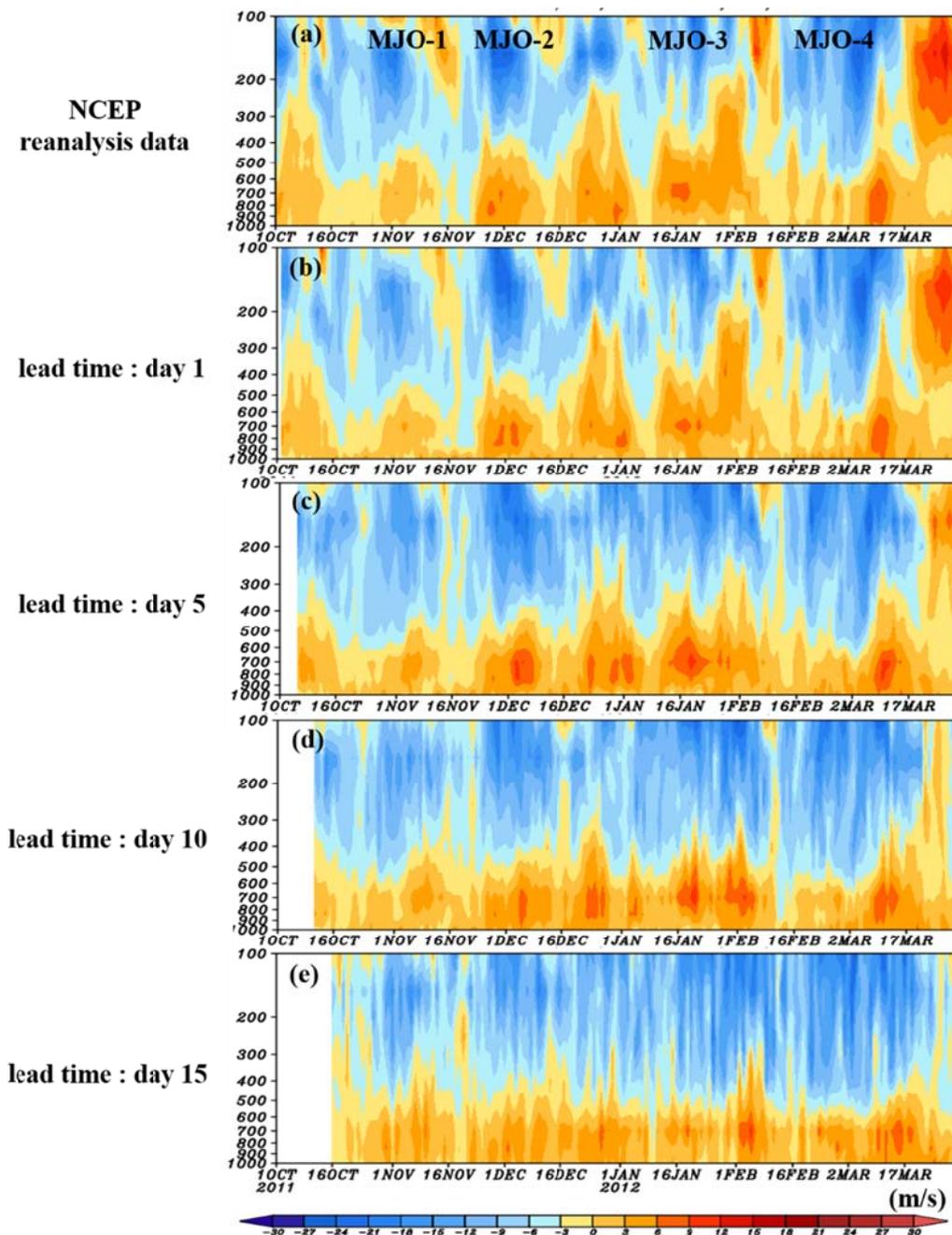


圖 4: 緯向風(m/s)範圍平均(63°E~83°E、10°S~10°N)垂直分佈時序圖，分別為(a)NCEP 再分析資料與(b)CWBGFS 模式預報第 1 天、(c)第 5 天、(d)第 10 天與(e)第 15 天的結果。

圖 5 為 CWBGFS 模式與 NCEP 再分析資料的平均偏差圖。在緯向風場中[圖 5(a)]，CWBGFS 模式於低對流層的西風有偏強的情形。且隨著預報天數增加，西風風場的強度與厚度逐漸增加，最大值出現於 700 hPa 以下，強度約為 2 m/s；而位於 100 hPa 高度則持續存在維持約-2.25 m/s 的東風風場偏差。

在相對溼度方面[圖 5(b)]，CWBGFS 模式呈現出於 850 hPa 至 600 hPa 間之中低對流層有偏乾的趨勢，偏乾最大值出現於 700 hPa，約為-4%。而在中高對流層(500 hPa 至 300 hPa 之間)，則呈現偏濕的情形，其偏濕最大值位於 400hPa，相對溼度偏差約 10 至 12%。

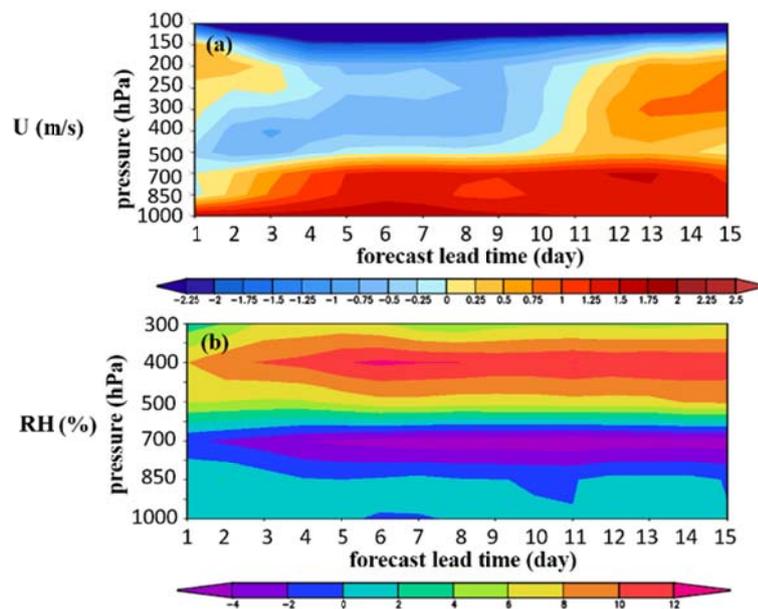


圖 5: CWBGFS 與 NCEP 模式的範圍平均(63° E~83° E、10° S~10° N)偏差值(GFS-NCEP)，分別為(a)緯向風場(m/s)與(b)相對濕度(%)。

### 三、 MJO 指數：

圖 6 為 NCEP 再分析資料與 CWBGFS 模式在 4 個不同預報時間，分別預報 MJO 事件 1 (2011 年 10 月 20 日至 11 月 20 日)、事件 2 (2011 年 11 月 17 日至 12 月 12 日) 及事件 3 (2011 年 12 月 23 日至 2012 年 1 月 23 日) 的 RMM 指數 (the Real-time Multivariate MJO; Wheeler and Hendon 2004) 相位圖。

於 MJO-1 事件中[圖 6(a)]，NCEP 再分析資料呈現 MJO 系統於印度洋西岸肇始，並隨著時間穩定地向東移動；MJO 系統於 2、3 相位 (印度洋地區) 時，RMM 指數的振幅強度逐漸減弱；至第 4 相位在海洋大陸上 (Maritime Continent) 後，MJO 對流系統再次增強；持續東移至第 1 相位 (非洲西岸) 後，對流強度

減弱並結束其生命週期，此結果與經過濾波後的外溢長波輻射(Outgoing Longwave Radiation; OLR)一致[圖 7(a)]。CWBGFS 模式在第 1 至 10 天預報 MJO-1 事件的結果，呈現對流系統於印度洋西岸生成並於非洲西岸消散，大致上掌握到 MJO-1 事件的對流肇始及系統移動的趨勢。CWBGFS 模式預報在第 1 與第 5 天的結果，呈現 MJO 對流生成位置稍微較 NCEP 分析場為偏東，對流強度較弱。而當對流系統東移至印度洋東岸接觸到陸地後，隨著預報天數增加，MJO 對流訊號減弱程度越顯著；並且在到達東太平洋時，對流系統再次增強的位置越偏向東邊，MJO 訊號強度增強的時間越晚，而預報第 1 天的結果在此時 MJO 訊號有過強的情形。CWBGFS 模式第 10 與第 15 天的預報結果，其對流生成位置較 NCEP 分析場為偏西，且振幅強度明顯偏弱。第 10 天的預報結果顯示，當對流系統到達中印度洋後，MJO 訊號便開始減弱至接近振幅 1 的強度，並維持其強度直至 MJO-1 事件結束為止。第 15 天的預報結果顯示，肇始位置明顯較 NCEP 分析場為偏西；並且在對流系統生成後，強度迅速減弱至接近振幅 1。而當系統通過第 4 相位後，訊號強度迅速下降至振幅 1 以下，一直到第 7 相位時有短暫的增強至振幅 1 以上，但隨後又迅速下降。

圖 6(b)中，NCEP 分析場顯示 MJO-2 事件對流系統於第 8 相位肇始，其振幅強度在第 8 至 2 相位中沒有太大的變化（約為振幅 2）。當對流系統抵達印度洋東岸後，強度迅速減弱，並於西太平洋（相位 6）下降至振幅 1 以下，顯示對流系統沒有通過西太平洋地區。在 CWBGFS 模式中，第 1 至 10 天的預報結果大致上有掌握到 MJO-2 事件之對流肇始及系統移動的方向。CWBGFS 模式預報第 1 天與第 5 天的結果，對流生成位置較 NCEP 分析場為偏西，在對流生成後強度便開始明顯減弱，振幅較 NCEP 分析場為弱；並且隨著預報天數增加，對流訊號減弱程度越多。當 MJO 系統到達印度洋東岸時，對流再次增強的位置也較為偏東，並且也有訊號過強的情形出現，此結果與 MJO-1 事件類似。之後對流系統於 5、6 相位消散，消散位置較為偏西；並隨著預報天數增加，對流系統減弱速度越明顯。CWBGFS 模式第 10 天的預報結果顯示，雖然對流生成位置與 NCEP 分析場較為接近，但強度明顯偏弱，振幅接近 1，並且在第 2 相位時，強度下降至振幅 1 以下。而第 15 天的預報結果顯示，在整個 MJO-2 期間，振幅皆維持在 1 以下。

MJO-3 事件期間[圖 6(c)]，由 NCEP 再分析資料顯示 MJO 對流系統大約於海洋陸地西岸肇始（相位 4），且訊號強度較前兩個事件為弱，大約為訊號 1 左右。MJO 系統生成後隨時間向東移的期間，對流越過海洋陸地時，訊號強度於第 5 相位便持續減弱至 1 以下，對流訊號不明顯。CWBGFS 模式於預報第 5 天以上的結果顯示，於對流肇始後，訊號強度便接近 0 的位置，且模式皆沒有合理的模擬出對流發展及系統東移的趨勢。

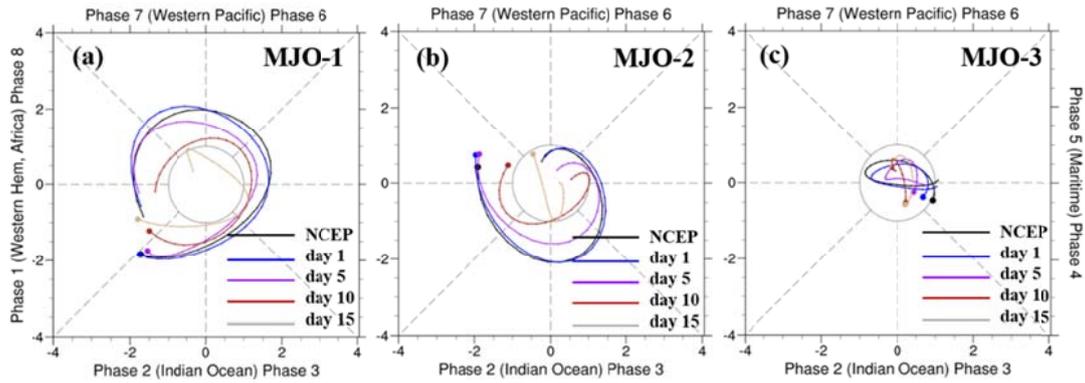


圖 6: DYNAMO 期間 3 個 MJO 事件的相位圖。實線的部分分別代表 NCEP (黑色) 及 CWBGFS 模式預報第 1 (紫色)、5 (藍色)、10 (紅色) 及 15 (灰色) 天的結果。圓點代表 MJO 肇始位置。

#### 四、 MJO 中 OLR 與 200 hPa、850 hPa 緯向風場：

圖 7 至圖 10 為使用帶通濾波器(Band Pass Filter; BPF)，濾出 20~100 天週期的 OLR 場、850 hPa 及 200 hPa 緯向風場距平中的 MJO 訊號，並將其南北緯 10 度間平均後的結果。

圖 7(a)顯示在 NCEP 再分析資料中，MJO-1 事件的 OLR 距平最小值（強對流）發生於 10 月下旬，其位在  $60^{\circ}\text{E}$  的位置，OLR 強度約為  $-30$  至  $-35 \text{ Wm}^{-2}$ ，且極值範圍狹窄。而 CWBGFS 模式對 MJO-1 事件的模擬，於預報第 1 天結果顯示[圖 7(b)]，OLR 極值發生位置與 NCEP 分析場類似，但其強度較強，大約為  $-35$  至  $-45 \text{ Wm}^{-2}$ ，且水平範圍較廣。而預報第 5 天的結果顯示[圖 7(c)]，對流生成位置與預報第 1 天之結果類似，但強度與範圍都明顯較強，且系統隨時間朝西發展，與 NCEP 分析場之 MJO-1 事件對流往東移動的結果相反。第 10 天與第 15 天的結果顯示[圖 7(d), (e)]，於 MJO 肇始時，對流強度較弱，OLR 值大約為  $-15$  至  $-30 \text{ Wm}^{-2}$  左右，且第 10 天預報的移動方向仍為朝西發展，而第 15 天預報則呈現緩慢向東移動或停留的情況。對於 MJO-2 事件而言，CWBGFS 模式預報第 1 天的 OLR 場，於對流肇始時強度偏弱，一直到印度洋後對流系統才逐漸增強，OLR 場的極值雖然與 NCEP 模擬結果相同，皆為  $-35$  至  $-45 \text{ Wm}^{-2}$  左右，但其水平範圍較小，位置也較為偏東，結果與 RMM 指數一致[圖 6(b)]。而第 5 天的預報結果顯示，極值發生範圍更小，位置也更偏向東邊，但對流系統移動方向仍為向東移動。第 10 天與第 15 天的預報結果顯示，OLR 強度明顯偏弱，約為  $-15$  至  $-30 \text{ Wm}^{-2}$ ，移動方向則轉為向西或停留的情況，此與 MJO-1 事件結果類似。MJO-3 事件期間，CWBGFS 模擬結果明顯偏弱，負 OLR 極值( $-35 \text{ Wm}^{-2}$ )位置偏東，並於預報第 5 天後，亦呈現出 MJO 向西移動及 OLR 偏大的情況。

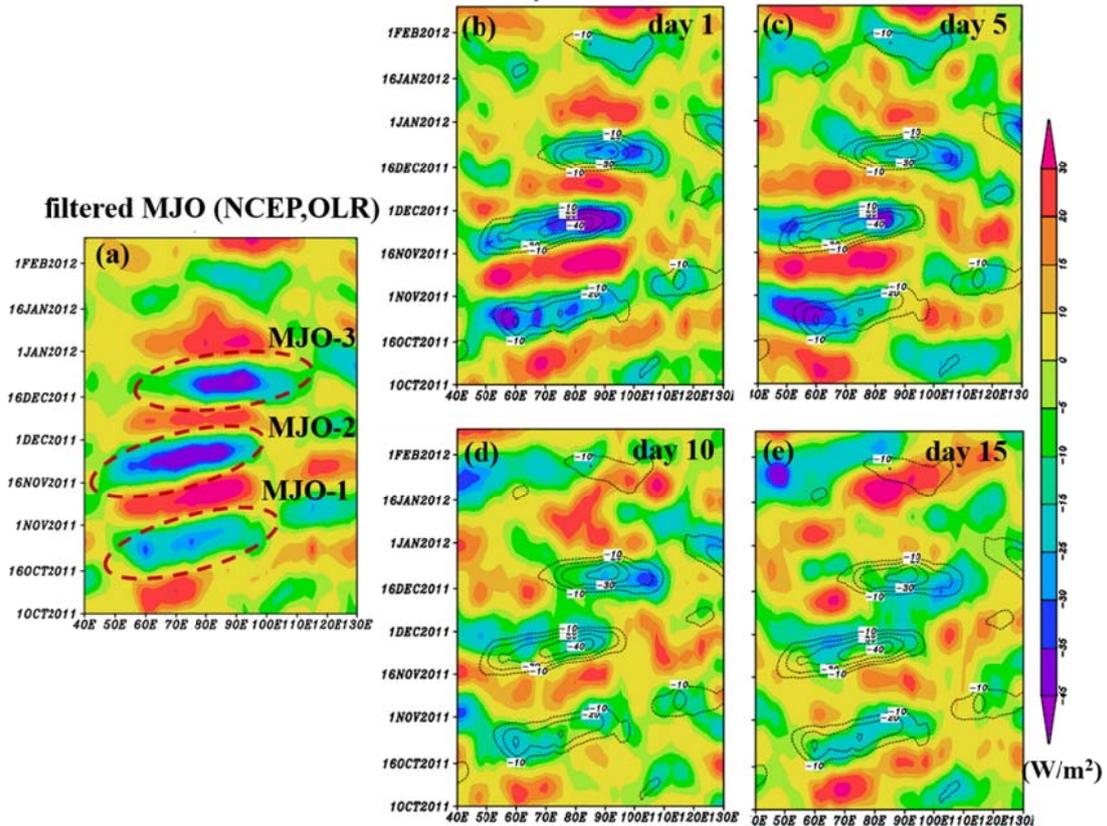


圖 7: 濾波後的 OLR( $\text{Wm}^{-2}$ )距平( $10^{\circ}\text{S}\sim 10^{\circ}\text{N}$  平均), 分別為(a)NCEP 再分析資料及(b)~(e)為 CWBGFS 模式預報第 1、5、10 和 15 天的結果。(b)-(e)的虛線為 NCEP 資料的 OLR 距平。

就 200 hPa 的緯向風場距平而言, CWBGFS 模式第 1 天與第 5 天的預報結果顯示, 於 MJO-1 事件肇始時, 東風增強的位置與 NCEP 再分析場相同, 大約在  $40^{\circ}\text{E}$  附近, 東風極值約為  $-12$  至  $-15$  m/s, 強度稍微較 NCEP 分析場為強。當對流系統東移至印度洋東岸後, 隨著對流系統減弱, 東風強度下降, 並於  $120^{\circ}\text{E}$  附近東風再次增強, 但強度較弱 (CWBGFS 模式預報為  $-3$  至  $-6$  m/s 而 NCEP 分析場顯示為  $-6$  至  $-9$  m/s)。模式預報第 10 天與第 15 天的緯向風場有類似的結果, 皆呈現出在對流肇始時, 東風增強位置較 NCEP 為偏西; 但是 CWBGFS 模式有掌握到東風減弱、再次增強與向東發展的特徵, 不過模式預報東風再次增強的位置較 NCEP 分析場為偏東, 強度較 NCEP 稍微偏弱。就 MJO-2 事件的模擬結果而言, CWBGFS 模式呈現於預報第 1 天與第 5 天的東風肇始位置偏西, 且強度較弱; NCEP 分析場為  $-9$  至  $-12$  m/s, CWBGFS 模式預報為  $-6$  至  $-9$  m/s, 東風減弱速率也較快。而 CWBGFS 模式第 10 天與第 15 天的預報結果顯示, 呈現出東風肇始位置偏西的程度較多, 且東風強度減弱的程度較 MJO-1 事件模擬結果為顯著, 約為  $-3$  至  $-6$  m/s。MJO-3 事件時, 由 NCEP 觀測資料顯示, 高層東風不明顯, 東風風速最大值約為  $-3$  至  $-6$  m/s, 而 CWBGFS 模式雖然於預報第 1 天時, 還能夠掌握到大約於  $70^{\circ}\text{E}$  轉變為東風風場並向東水平延伸的結構。但於預報第 5 天以後, 則呈現於高對流層為弱風場的情況, MJO 系統造成高層風場結構改變的特徵消失。

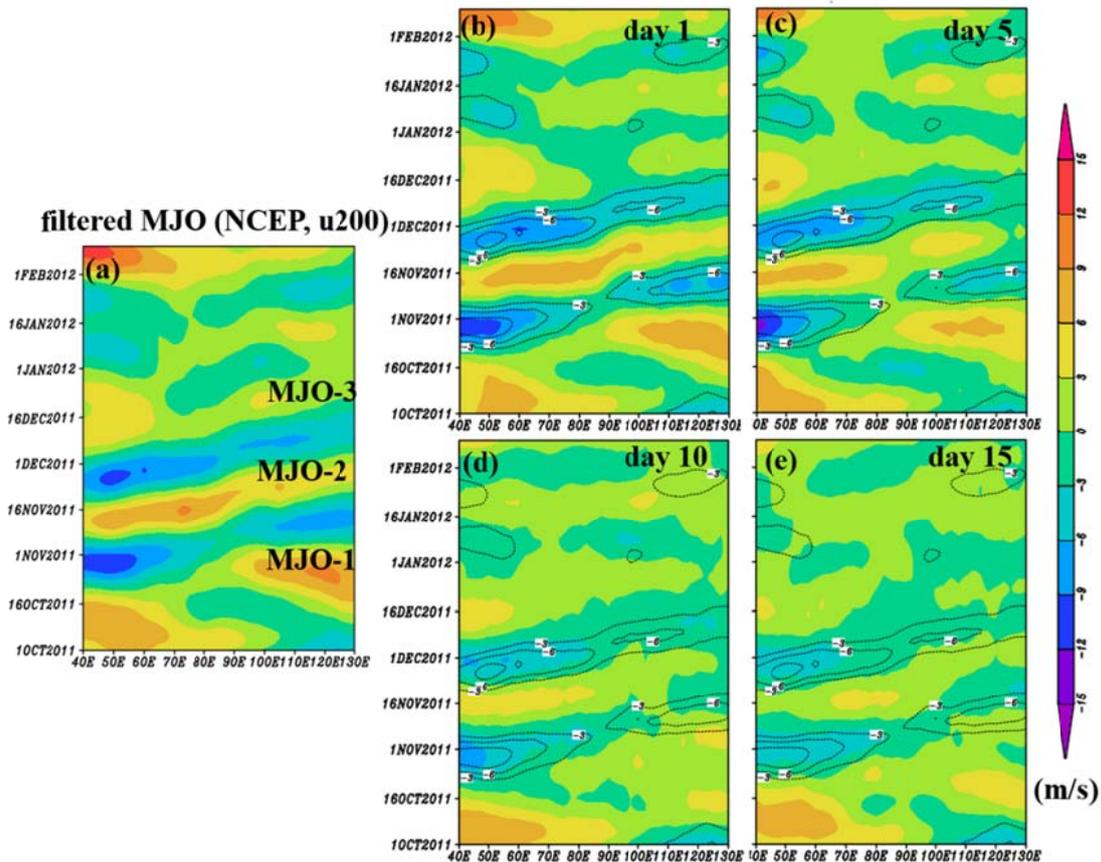


圖 8: 同圖 7 但為 200 hPa 緯向風距平(m/s)。

就 850 hPa 的緯向風場距平而言，CWBGFS 模式於預報第 1 天與第 5 天的結果顯示，在 MJO-1 事件肇始時，西風有偏強的情形，CWBGFS 預報強度超過 4 m/s，而 NCEP 分析場則為 2 至 3 m/s；且極值分佈範圍較廣，位置稍微偏西，其模擬結果皆有掌握到緯向風場於 120°E 及接近換日線的兩個極值。預報第 10 天與第 15 天的模擬結果顯示，在西風肇始時的風場強度與範圍也有較 NCEP 分析場偏強的特徵，且西風極值的位置也明顯偏西(~30°E)，強西風範圍明顯較預報之第 1 天與第 5 天結果為小，而發生於印度洋東岸及換日線位置的西風極值強度也明顯偏弱。但是在西風減弱、再次增強與向東發展之整體趨勢上，CWBGFS 模式皆有掌握到 MJO-1 事件的特徵。在 MJO-2 事件方面也有類似的結果，但是預報第 1 天至第 15 天預報西風肇始的位置與 NCEP 再分析場相同(~60°E)，且皆有向東移動的特徵。CWBGFS 模式預報第 1 天與第 5 天之強西風發生的範圍較 NCEP 分析場的結果為更廣，其中預報第 5 天之結果顯示 2 至 3 m/s 的西風強度一直維持至 120°E 左右。但是在預報第 10 天與第 15 天卻有相反的結果，其西風肇始的強度與水平範圍明顯偏小，強度約為 3 至 4 m/s，並且於對流系統到達 90°E 後，西風強度迅速減弱至 1 至 2 m/s，但其趨勢上 CWBGFS 模式仍有掌握到 MJO-2 事件的特徵。而 MJO-3 事件期間，就觀測而言，由於低層西風風速較

高層東風強，因此相較於高層風場的結果，CWBGFS 模式對於低層西風的掌握度較高；CWBGFS 於預報第 5 天以內，皆能掌握到西風最大值的位置，並於預報 15 天以內，能夠掌握低層西風增強的特徵。

綜合以上結果，顯示在 MJO 對流特徵主要的三個變數場 (OLR 場、200 hPa 緯向風場、及 850 hPa 緯向風場)，CWBGFS 模式於 DYNAMO 實驗期間針對 MJO-1 至 MJO-3 事件，相較於 NCEP 之觀測分析而言，模式對於緯向風場的掌握程度較高，於預報第 15 天內，CWBGFS 模式仍能合理地模擬出 MJO 向東移動、再次增強及對流極值發生位置的特徵。在 OLR 場方面，對於 MJO-1 及 MJO-3 事件，CWBGFS 模式預報第 5 天過後，便無法掌握到 MJO 系統向東移動的特徵；對於 MJO-2 事件而言，模式預報第 10 天後其負值的 OLR 分佈較為零散，且向東移動的訊號較不明顯，呈現對流停滯的情況。由於緯向風場對於 RMM 指數的貢獻度較 OLR 場為高(Liu et al. 2016)，因此雖然 CWBGFS 模式對於 OLR 場之預報在第 5 或第 10 天後，並沒有明顯向東移動的訊號，但是模式在緯向風場方面仍有掌握到 MJO 東移的趨勢特徵，所以 CWBGFS 模式在 MJO 相位圖中仍呈現出向東移動的分佈。

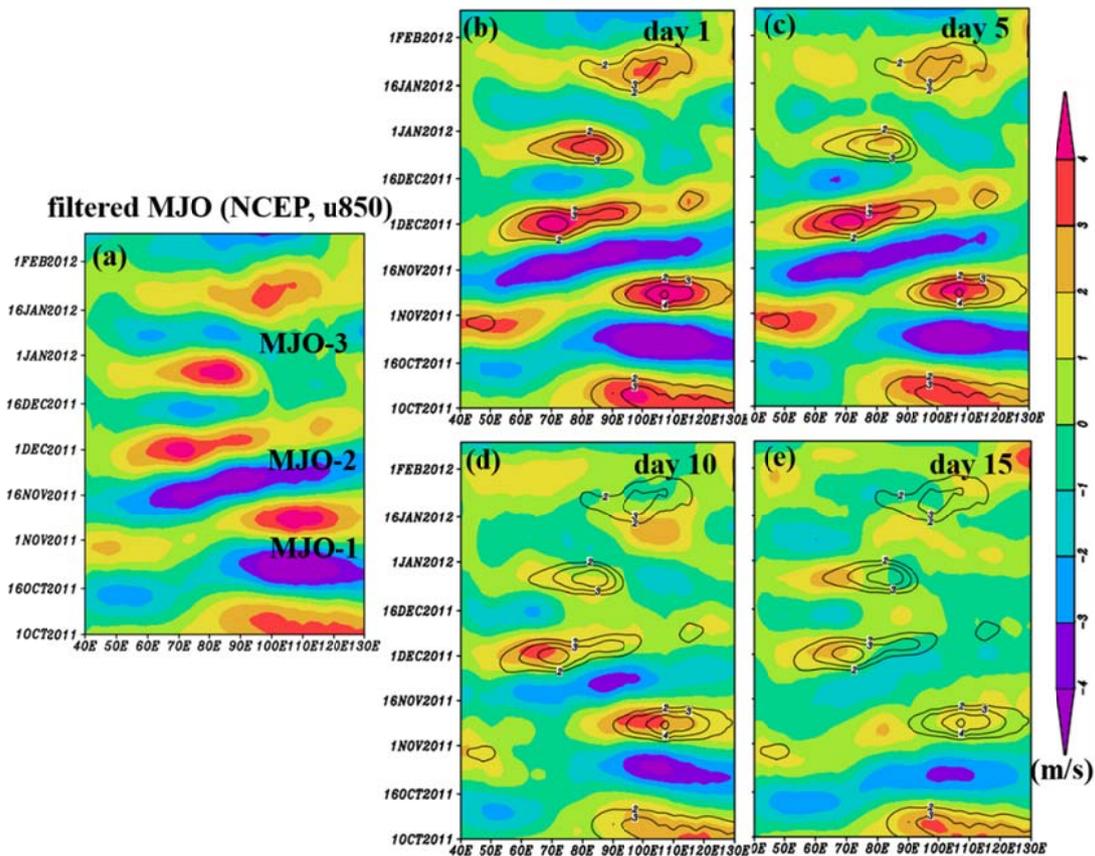


圖 9: 同圖 7 但為 850 hPa 緯向風距平(m/s)。

## 五、 RMM 指數的相關係數與均方根誤差：

圖 10 為參考 Lin, Brunet, and Derome (2008)的方法，計算 CWBGFS 模式與 NCEP 分析場於 MJO-1 至 MJO-3 事件期間的 RMM 指數雙變數相關係數(bivariate correlation; COR)及均方根誤差(root-mean-square error; RMSE)，其計算公式如下：

$$\text{COR}(\tau) = \frac{\sum_{i=1}^N [a_{1i}(t)b_{1i}(t) + a_{2i}(t)b_{2i}(t)]}{\sqrt{\sum_{i=1}^N [a_{1i}^2(t) + a_{2i}^2(t)]} \sqrt{\sum_{i=1}^N [b_{1i}^2(t) + b_{2i}^2(t)]}}$$

$$\text{RMSE}(\tau) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \{[a_{1i}(t) - b_{1i}(t)]^2 + [a_{2i}(t) - b_{2i}(t)]^2\}}$$

式中  $a_{1i}(t)$ ,  $a_{2i}(t)$  分別代表 RMM1 及 RMM2 在時間(t)的觀測值， $b_{1i}(t)$  及  $b_{2i}(t)$  則代表模式預報值。

於圖 10(a)中 MJO-1 事件的結果，在預報第 15 天內，NCEP 分析與 CWBGFS 預報的 RMM 指數的相關係數維持在 0.85 以上；對於 MJO-2 事件而言，於預報第 2 天時，兩者的相關性開始明顯下降，並於第 11 天後，相關係數下降至 0.85 以下。而 MJO-3 事件則於預報第 5 天後，相關性便迅速下降，於預報第 9 天後，相關係數小於 0.5。在均方根誤差(RMSE)中[圖 10(b)]也有類似的結果，MJO-1 事件期間，預報第 13 天後 RMSE 超過 1 以上。MJO-2 事件在預報第 2 天後 CWBGFS 預報與 NCEP 分析之間相差的程度迅速上升，並且在第 11 天相差超過 1 以上，而 MJO-3 事件的誤差，則趨近於 MJO-1 事件的結果。由於在 MJO 相位圖中，CWBGFS 模式預報第 15 天以內，MJO-1 及 MJO-2 的結果在系統移動趨勢上大致與 NCEP 再分析結果相同，因此使得相關係數維持在 0.5 以上。其中 MJO-2 事件的相關性較 MJO-1 事件為差，且在預報第 11 天後相關性迅速下降。推斷可能是由於在 200 hPa 緯向風場上，MJO-1 事件在預報第 10 天與第 15 天[圖 8(d)、(e)]仍能較合理地模擬出 MJO 肇始時東風增強的位置( $\sim 40^\circ \text{E}$ )，且東風極值的強度也較 MJO-2 事件時較接近 NCEP 再分析資料的觀測結果[MJO-1 事件差約  $-3 \text{ m/s}$ ，而 MJO-2 事件差約  $-6 \text{ m/s}$ ]，因此造成 CWBGFS 模式在預報 MJO-1 事件時，於預報第 15 天內有較合理的結果。MJO-3 事件期間，CWBGFS 模式於預報第 5 天後，並沒有合理的模擬出 200 hPa 的緯向風場及 OLR 的強度與變化，造成 MJO 指數的相關性較低的情況。

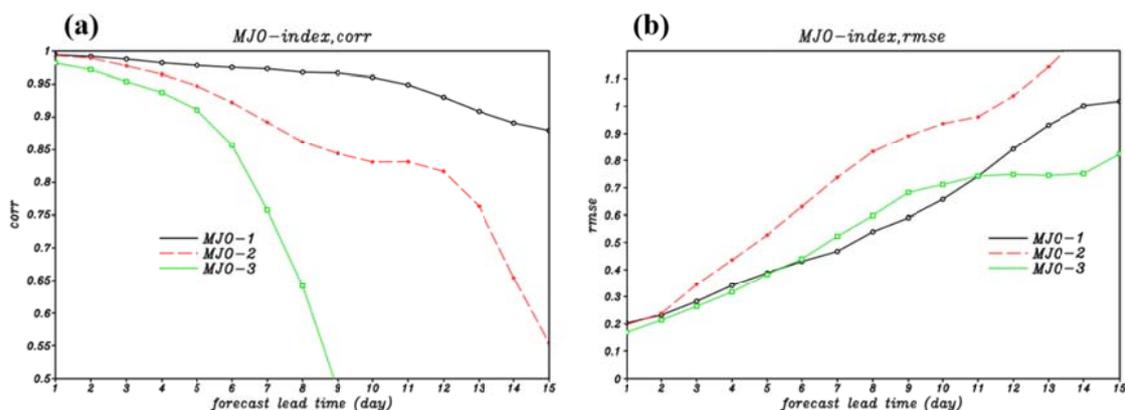


圖 10: RMM 指數的(a)相關係數及(b)均方根誤差。

## 六、物理參數化法敏感度實驗：

於事後模擬(hindcast)實驗中，將 OLR 距平經過濾波後，MJO-1 及 MJO-3 事件於預報第 5 天過後，模式便無法合理地模擬出 MJO 系統東移的特徵，其結果呈現由東向西移動的情況，明顯與 NCEP 再分析資料中，MJO 對流移動方向相反；而 MJO-2 事件則於預報第 10 天後，負值的 OLR 距平分佈較為零散，且其東移的訊號較不明顯，甚至呈現停留的情況。因此，我們嘗試使用不同的物理參數化方法，進行敏感度測試實驗，找出適合 CWBGFS 模擬 MJO 系統的物理參數化方案組合。

### a. 敏感度實驗設計:

於敏感度實驗中考慮 New Simple Arakawa Schubert (NSAS; Arakawa and Scherbert, 1974) 及 Tiedtke (TDK; Tiedtke, 1993) 兩種不同積雲參數化方案，並分別搭配不同的淺對流參數化以及邊界層(PBL)參數化方案，如表 1 所示。淺對流方案包括 Frank version 及 NCEP 2010，PBL 方面則為 Hong and Pan (1996) 以及 Han and Pan (2011) 的方案。輻射參數化方法，則由原本於事後模擬實驗中使用 Fu and Liou (1992; 1993)方案改為 Rapid Radiative Transfer Model for GCMs (RRTMG)方案。另外，為了簡化模式中的物理過程，敏感度實驗中不考慮海溫變化，即海溫假設為常數。控制組實驗的物理參數化法使用 c3s1p3 方案，與事後模擬實驗的設定相同，而輻射參數化法為 Fu and Liou (1992; 1993)方案。

shallow convection & PBL cumulus scheme		Shallow convection			
		Frank version (s1)		NCEP.2010 (s2)	
		PBL		PBL	
		Hong and Pan .1996 (p2)	Han and Pan .2011 (p3)	Hong and Pan .1996 (p2)	Han and Pan .2011 (p3)
cumulus	NSAS (c3)	c3s1p2	c3s1p3	c3s2p2	c3s2p3
	Tiedtke (c4)	c4s1p2	c4s1p3	c4s2p2	c4s2p3

表 1: 物理參數化法敏感度實驗設計表。

模擬策略方面則使用 CWBGFS 模式於 2011 年 10 月至 12 月，每月的 1 日及 15 日 00Z 的再分析資料作為敏感度實驗的初始場，各初始場模擬 15 天後，再將其結果串連後得到連續 3 個月的模擬結果。

b. 敏感度實驗模擬結果:

圖 11 為不同物理參數化法的敏感度實驗 OLR 距平時序圖，其結果呈現出，在 CWBGFS 模式使用 NSAS 積雲參數化法下[圖 11.(b)~(e)]，不管搭配何種淺積雲參數化或是邊界層參數化方案，對流系統強度皆較 NCEP 及 CTL 的結果弱[圖 11(a), (f)]，隨著預報天數增加，對流系統便逐漸減弱，沒有掌握到 DYNAMO 期間 MJO 系統發展的特徵及對流強度。其中使用 NCEP (2010)的淺積雲參數化方案的結果[圖 11.(c), (e)]，則呈現當對流生成後便迅速消散，顯示在 CWBGFS 在模擬 MJO 系統時，較不適合使用 NSAS 積雲參數化法搭配 NCEP (2010)淺積雲參數化的方案。圖 11(g)~(j)為 Tiedtke 積雲參數法的模擬結果，相較於 CTL 及 NSAS 模擬結果，於 MJO-1 期間，負 OLR 距平的極值(-80 Wm<sup>-2</sup>)分布較廣，對流明顯於系統肇始初期發展較強，且 MJO 東移的特徵較為明顯。於 120°E 左右，當系統通過海洋陸地地區時，對流強度較接近於 NCEP 再分析資料的結果。於 MJO-2 期間，呈現於印度洋地區 OLR 距平變得較為零散的分佈，相較於 MJO-1 期間，對流系統強度明顯發展的較弱。

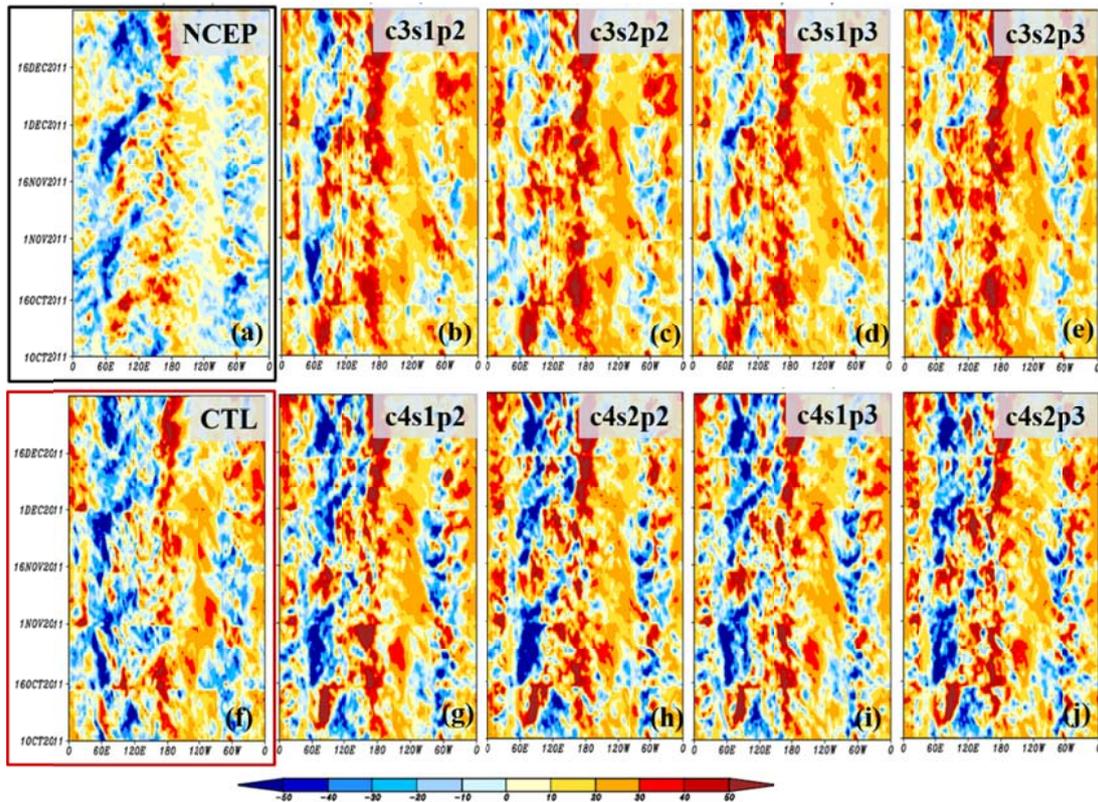


圖 11: 物理參數化法敏感度實驗 OLR 距平( $\text{Wm}^{-2}$ )時序圖，分別為(a)NCEP 再分析資料和(b)~(e)、(g)~(j)搭配不同物理參數化法實驗，實驗名稱如表 1，以及(f)控制組實驗。

由敏感度實驗與 NCEP 再分析資料的 OLR 距平偏差圖中(圖 12), CWBGFS 模式使用 NSAS 方案的模擬結果，不管在 MJO-1 或 MJO-2 期間，對流系統明顯偏弱，OLR 距平值偏大，但 MJO 發展的相位位置接近於 NCEP 再分析資料[圖 12(b)~(e)]。而模式使用 Tiedtke 方案的結果則呈現出於 MJO-1 期間，模擬對流的強度有明顯偏強的現象，但於 MJO-2 期間，由於 Tiedtke 方案模擬的負值 OLR 距平相位較為偏向東邊，造成原本 NCEP 再分析資料中 MJO 發展的區域，OLR 值偏大，而其他區域則偏小的情況[圖 12(g)~(j)]。

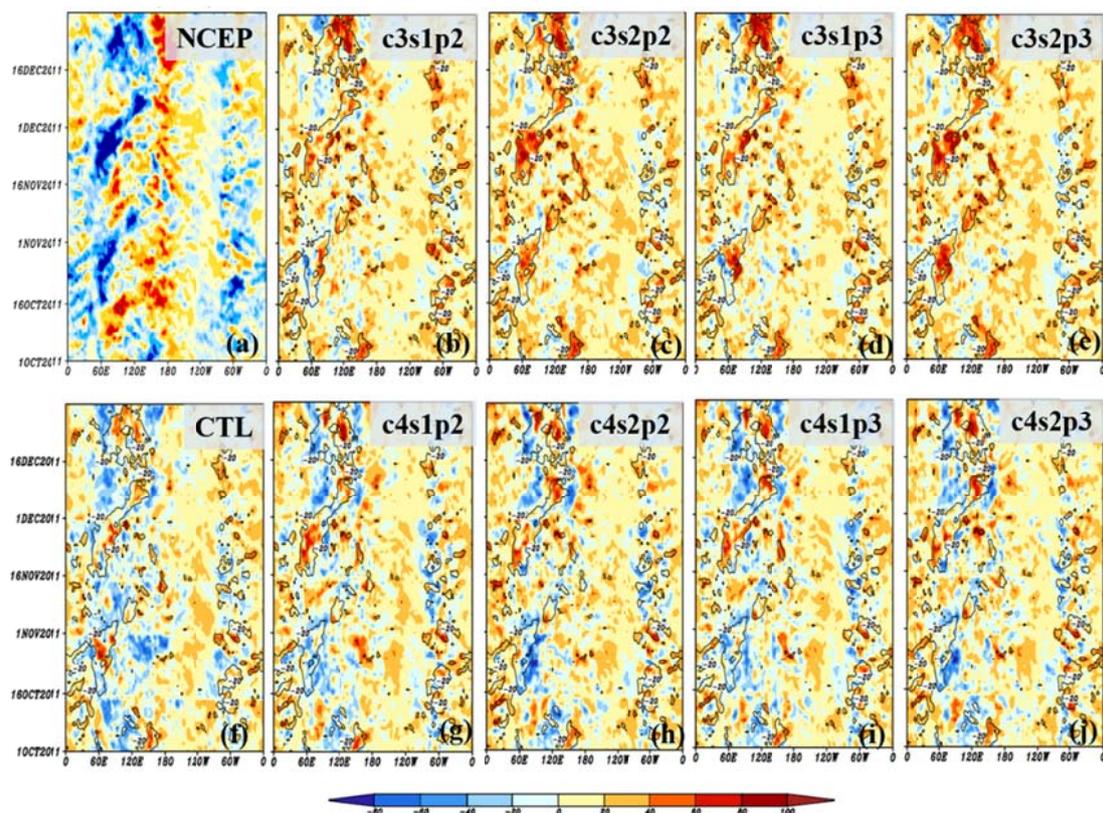


圖 12: 敏感度實驗與 NCEP 再分析資料的 OLR 距平偏差(GFS-NCEP)，顏色部分為 OLR 距平 ( $\text{Wm}^{-1}$ )，黑色等值線為 NCEP 再分析資料 OLR 距平小於  $-20 \text{ Wm}^{-1}$ 。

圖 13 為 NCEP 再分析資料與 8 個敏感度實驗 OLR 距平的相關係數與均方根誤差。相關係數中[圖 13(a)]，呈現出將輻射參數化法改為 RRTMG 後，OLR 距平的相關性皆有提高，CWBGFS 模式對於 MJO 系統對流發展的趨勢上掌握度增加。我們比較 NSAS 與 Tiedtke 方案模擬結果的差異，不管是 10 月至 12 月三個月的平均或是 MJO-1 及 MJO-2 事件期間的平均，CWBGFS 模式使用 Tiedtke 積雲參數化法的結果，相關係數皆較使用 NSAS 方案結果高，而其中以 Tiedtke 搭配 Frank version 的淺積雲參數化法及 Han and Pan (2010)方案的邊界層參數化法相關性最高(c4s1p2)。而均方根誤差中[圖 13(b)]，NSAS 方案的誤差明顯較 Tiedtke 方案的結果小很多，其可能的原因是，雖然 NSAS 方案模擬的對流強度較弱，但其對流的相位與觀測值較為一致，而 Tiedtke 方案於 MJO-1 期間對流明顯偏強、MJO-2 期間相位稍微偏移的現象，導致 OLR 距平誤差的累加，使得模式使用 Tiedtke 方案後，對於 MJO 系統的發展趨勢上的掌握度較好，但對流強度誤差較大的情況。

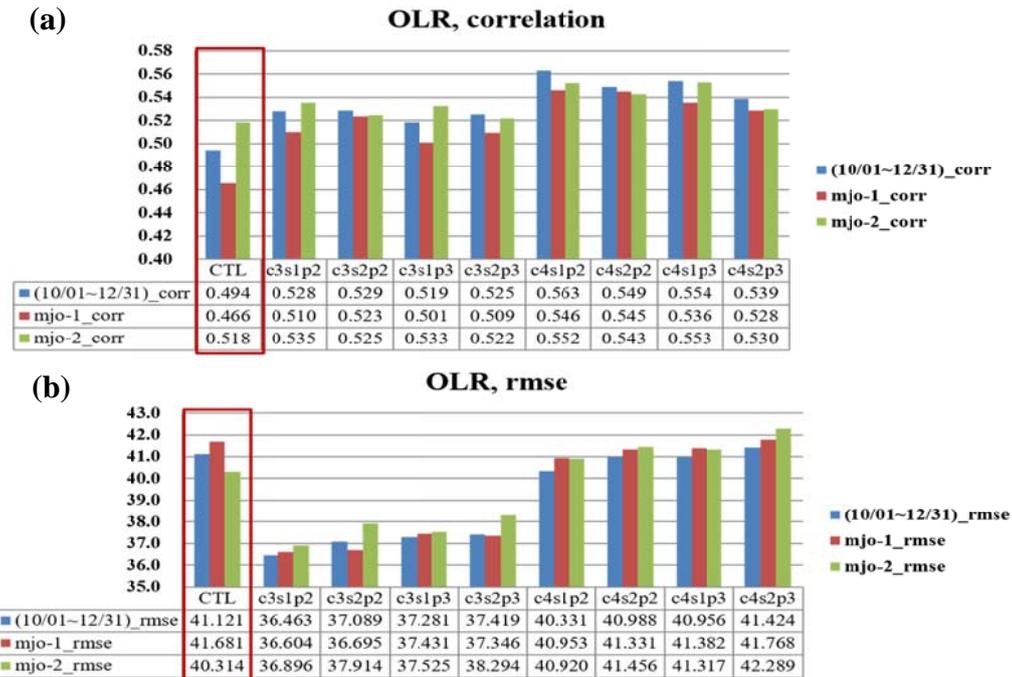


圖 13: NCEP 再分析資料與敏感度實驗的(a)OLR 距平相關係數與(b)均方根誤差。藍色代表 2011 年 10 月至 12 月期間平均, 紅色代表 MJO-1 期間平均, 而綠色則為 MJO-2 期間平均結果。

由 NCEP 再分析資料與敏感度實驗的 OLR 距平相關係數與均方根誤差隨預報天數變化之時序圖顯示(圖 14), 將輻射參數化法改為 RRTMG 方案後, NSAS 方案及 Tiedtke 方案於預報第 1 天時, 其相關係數明顯較 CTL 模擬結果高[圖 14(a)], 直到預報第 6 至 7 天後, 相關性逐漸下降, 接近於 CTL 控制組實驗的結果。其中 c4s1p2 的模擬, 於預報第 10 天以前, 相關性維持 0.5 以上, 相關性最高。比較 NSAS 與 Tiedtke 方案, 雖然 Tiedtke 方案在預報第 1 至 3 天有較好的相關性, 但於第 3 天後, 相關性便下降於接近 NSAS 方案的結果, 顯示將積雲參數化法由 NSAS 方案改為 Tiedtke 方案後, 對於 OLR 距平的相關性增加的程度有限。

均方根誤差中[圖 14(b)], 其結果與圖 13(b)類似, 由於 Tiedtke 方案模擬 MJO 系統的結果有相位偏差的現象, 因此均方根誤差於預報第 1 天後, 便迅速上升, 對流強度偏差逐漸增加, 導致 OLR 距平誤差大於 NSAS 模擬結果。

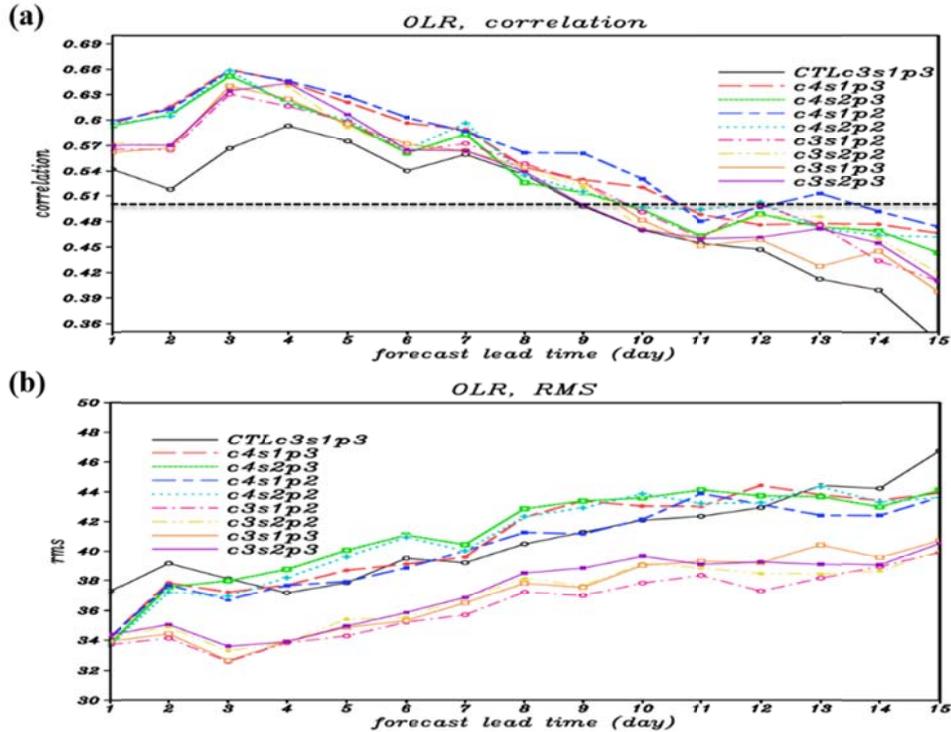


圖 14: NCEP 再分析資料與敏感度實驗 OLR 距平的(a)相關係數與(b)均方根误差隨預報天數變化之時序圖。

將 OLR 距平經過濾波後，結果顯示使用 NSAS 方案的模擬[圖 15(b)~(e)]，於 MJO-1 期間系統仍為由西向東移的情況，且對流強度偏弱，甚至發展不連續的情況(c3s1p3)，對於 CWBGFS 模式模擬 MJO 系統沒有明顯的改善。而將積雲參數化法改為 Tiedtke 方案後，模擬 MJO-1 對流系統轉為由西向東移動，但模擬對流系統強度則於 MJO-1 期間有偏強的情況，且負 OLR 極值範圍較廣，而 MJO-2 期間則為偏弱的現象。

200 hPa 或 850 hPa 緯向風場方面(圖 16、圖 17)，其結果與 OLR 距平(圖 15)類似；Tiedtke 方案的緯向風風速較接近於 NCEP 再分析資料的結果，並於 MJO-1 事件期間，風速較觀測值強，而於 MJO-2 期間風速偏弱，但沒有如 OLR 距平分析場中相位明顯偏移的特徵。而 NSAS 方案則於兩個事件期間皆呈現風速偏弱的現象。

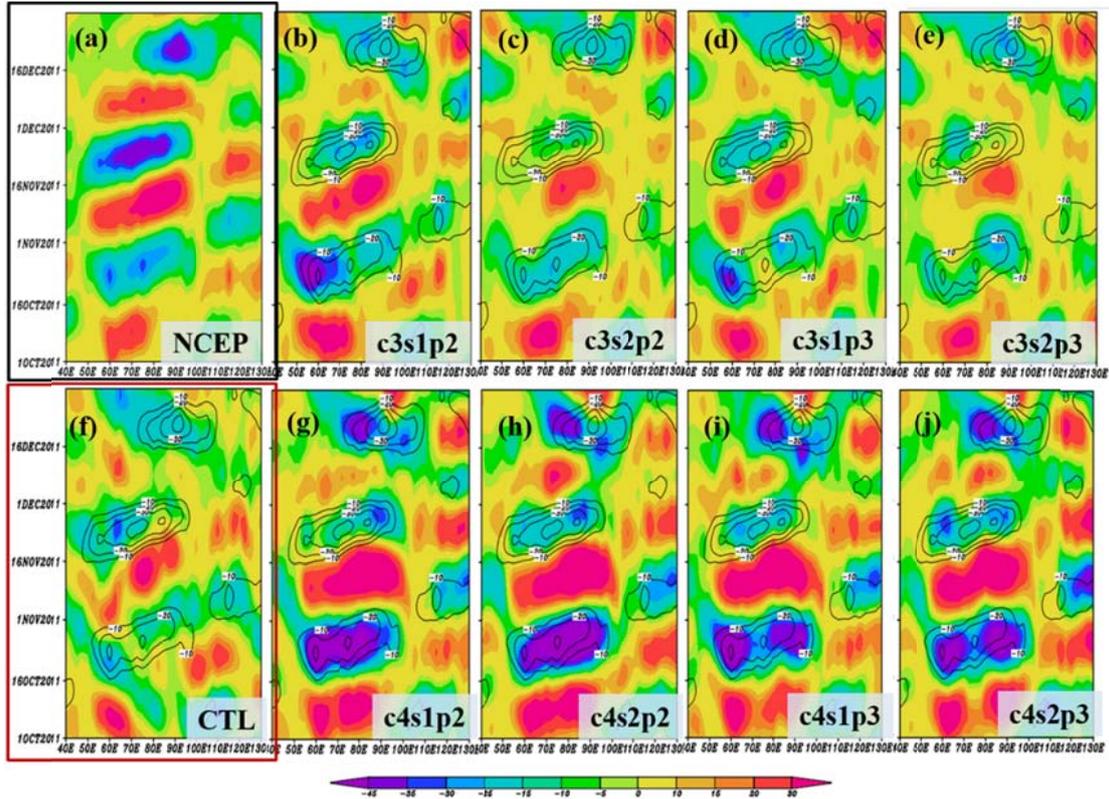


圖 15: 同圖 7 但為物理參數化敏感度實驗的結果。等值線代表 NCEP 再分析資料之 OLR 距平小於  $-10 \text{ Wm}^{-2}$ ，間距為  $10 \text{ Wm}^{-2}$ 。

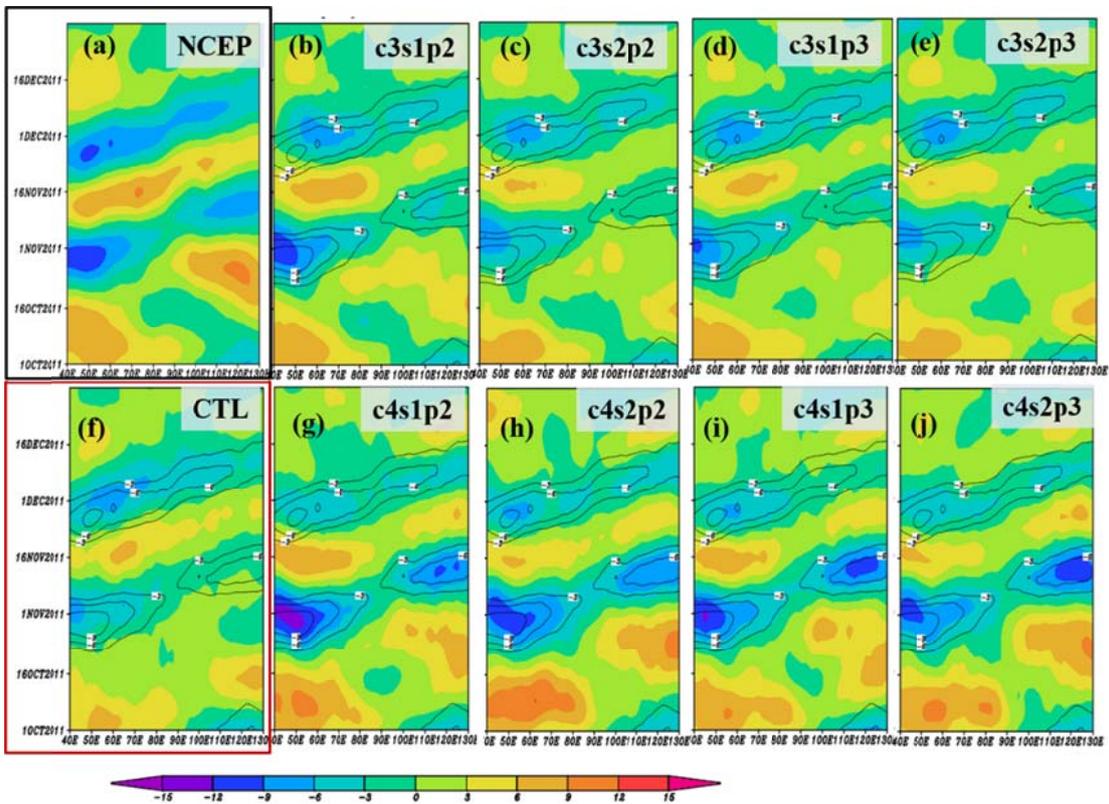


圖 16: 同圖 15 但為 200hPa 緯向風場(m/s)。虛線為 NCEP 再分析資料之風速小於  $3 \text{ m/s}$  的等值線。

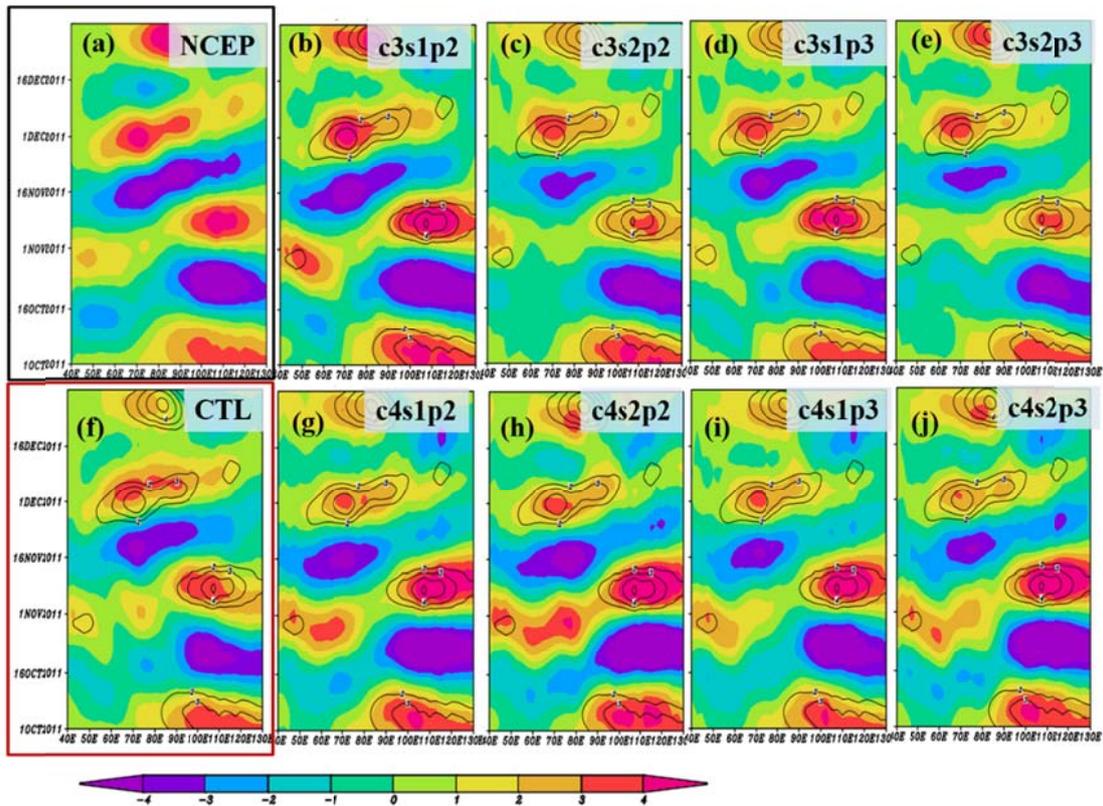


圖 17: 同圖 15 但為 850hPa 緯向風場(m/s)。實線為 NCEP 再分析資料之風速大於 2m/s 的等值線。

由 MJO 指數相位圖中 (圖 18)，於 MJO-1 事件期間[圖 18(a)]，CWBGFS 模式使用 Tiedtke 方案的模擬相較於 NCEP 再分析資料而言，皆於印度洋地區對流訊號有明顯過強的情形，當 MJO 對流系統通過海洋陸地地區時，模式有掌握到系統減弱並再次增強的特徵，而於西半球時系統逐漸減弱消散，消散位置稍微較觀測結果偏西。NSAS 方案的模擬顯示，雖然在 MJO 肇始時的訊號強度和肇始位置較與觀測值一致，但大部份的模擬其訊號強度較 NCEP 觀測偏弱，而消散位置則與 Tiedtke 方案模擬結果類似，皆有偏西的現象。

MJO-2 事件期間[圖 18(b)]，NSAS 方案與 Tiedtke 方案的模擬結果特徵與 MJO-1 事件期間類似；Tiedtke 方案對流訊號較 NSAS 方案模擬結果強、消散位置偏西。但 Tiedtke 方案在 MJO-2 期間，當 MJO 對流肇始時，雖然訊號強度與觀測值較為一致，當對流於印度洋東岸時，對流訊號逐漸削弱，並沒有掌握到對流增強的特徵，並於通過海洋陸地地區時，強度減弱至訊號 1 以下。而 NSAS 方案則於 MJO 對流生成後，訊號便逐漸下降，並於印度洋地區下降至訊號 1 以下，並沒有合理地模擬出 MJO-2 期間對流系統的發展。

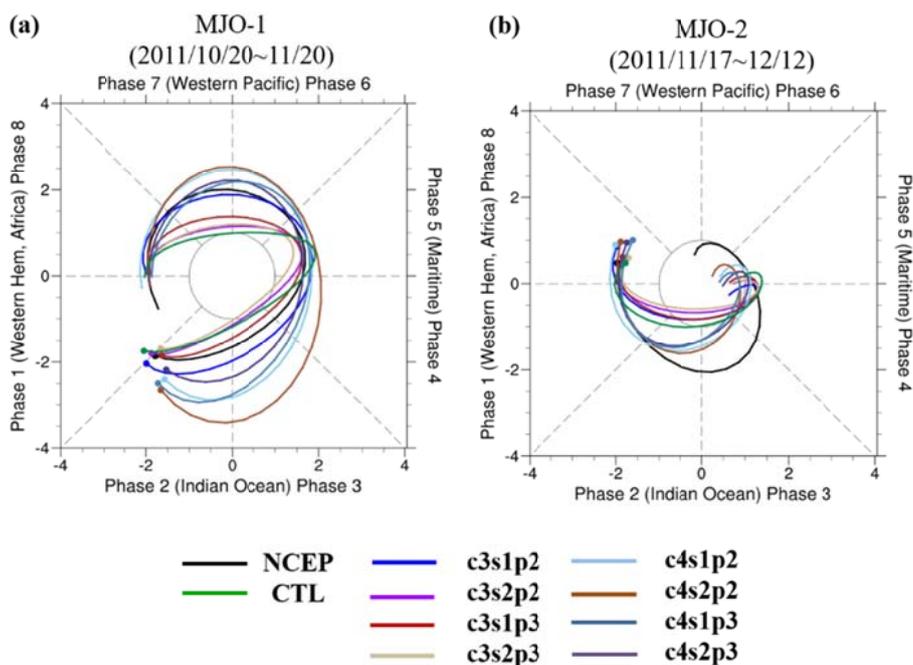


圖 18: 物理參數化法敏感度實驗的 MJO 指數。實驗名稱如表 1。

透過 MJO 指數的相關係數與均方根誤差分析 (圖 19)，於 MJO-1 期間，不管是控制組 CTL 實驗或是 NSAS 方案和 Tiedtke 方案的敏感度實驗，其相關係數都達到 0.90 以上[圖 19(a)]；這顯示於此期間，CWBGFS 模式皆有掌握到對流訊號的減弱、再次增強的趨勢。在 MJO-2 期間，模式使用 NSAS 積雲方案的模擬，於 MJO 肇始後對流訊號便持續下降，沒有掌握到對流系統發展的變化。而在 Tiedtke 方案的部分，雖然於非洲、西印度洋地區的訊號強度與觀測值一致，但隨著對流系統移入東印度洋時，模式亦沒有掌握到對流再次增強的趨勢[圖 18(b)]。因此，就相關係數而言，物理參數化敏感度實驗的結果於 MJO-2 期間的相關性皆較 MJO-1 期間低[圖 19(a)]，而使用 Tiedtke 方案時，除了 c4s2p3 實驗，MJO 指數的相關性達 0.85 以上，相關性皆較控制組實驗與 NSAS 方案高。

MJO 指數的均方根誤差的顯示[圖 19(b)]，Tiedtke 方案的模擬於 MJO-1 事件期間，對流系統於印度洋地區訊號過強，導致強度誤差增加，使得大部份的 NSAS 方案之實驗模擬對流強度誤差的結果較 Tiedtke 方案低。而 MJO-2 期間，則呈現相反的情形，即由於 NSAS 方案的模擬 MJO 訊號的強度於系統生命期間皆明顯較觀測值低，導致訊號強度誤差偏高。

綜合以上分析敏感度實驗與 NCEP 再分析資料的 OLR 距平與 MJO 指數相關係數與均方根誤差結果，CWBGFS 模式使用 Tiedtke 積雲參數化方案、Frank version 的淺積雲參數化法及 Hong and Pan (1996)的邊界層參數化實驗(c4s1p2)，並將輻射參數化法改為 RRTMG 方案後，於 DYNAO 期間的 10 月至 12 月，就整

體模式表現而言，可以呈現出較為合理的模擬結果。

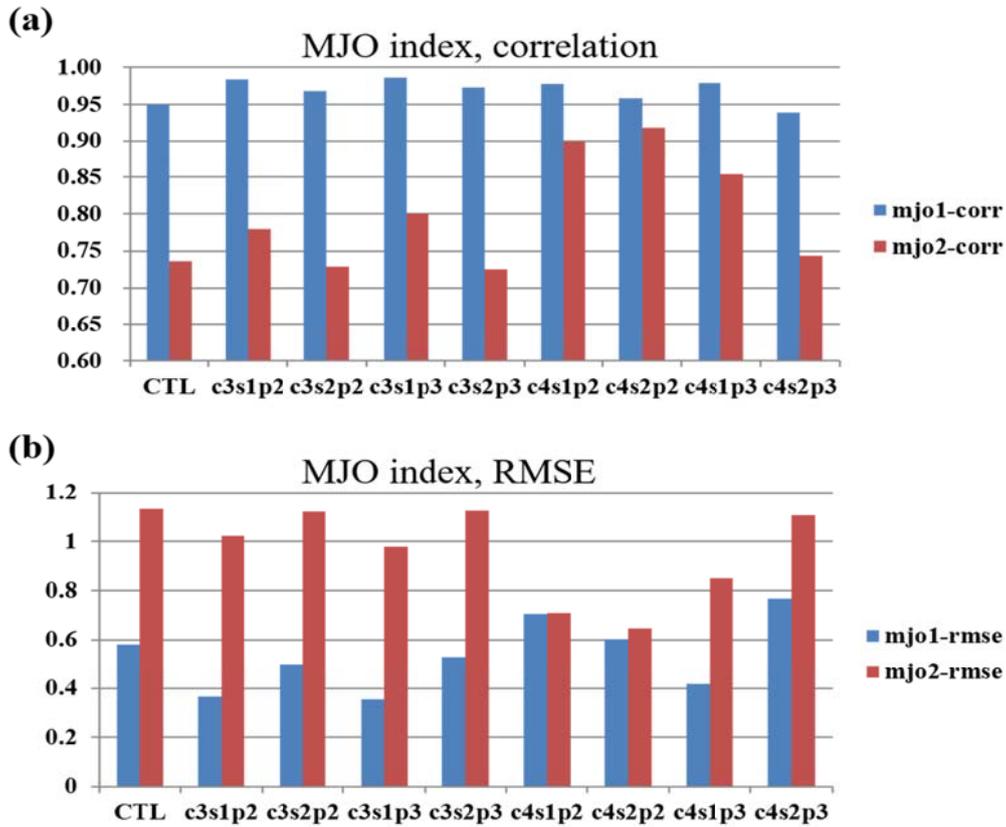


圖 19: NCEP 再分析資料與敏感度實驗的 RMM 指數(a)相關係數與(b)均方根誤差。

## 七、系集模擬實驗：

為了掌握模式預報的不確定性，本計畫使用中央氣象局現有的奇異向量 (singular vector) 技術[賴等人(2014)]，於模式初始場產生 20 組線性獨立的擾動差異之系集成員，進行系集預報(ensemble forecast)實驗，並討論系集預報對於 MJO 對流系統模擬的表現。

系集預報實驗中，選擇 DYNAMO 期間 MJO 對流系統發展訊號較為明顯的 MJO-2 個案 (2011 年 11 月 17 至 12 月 12) 進行模擬。因此，模式以 2011 年 11 月 15 日及 11 月 30 日，作為兩個初始場時間並分別進行 15 天預報，再將預報結果串連後成為完整 1 個月且完整涵蓋 MJO-2 事件生命週期的模擬實驗。物理參數化法的設定，則使用於敏感度實驗中，模擬 MJO 對流系統表現較與觀測結果接近的 c4s1p2 實驗參數化方案。

將奇異向量技術進行初始場擾動的範圍，設定於印度洋及太平洋海域，並將此範圍分為 1 至 3 種區域（圖 20），嘗試透過數學方法計算這三種不同區域 (domain) 內擾動場快速發展的模態，而計算出多組初始擾動成員後，討論系集預報的表現。由 MJO 指數相位圖中（圖 21），使用 1 個區域的模擬，呈現出大部分的系集成員訊號強度於 MJO-2 事件生命週期期間，訊號皆集中於控制組實驗，並於印度洋及西太平洋海域訊號皆明顯小於 NCEP 再分析資料的訊號強度，此結果顯示各組系集成員發散的效果並不明顯，且大部分的成員皆沒有掌握到印度洋海域 MJO-2 事件對流系統增強的訊號，並於系統通過海洋陸地地區後，系統無法維持其對流強度而迅速減弱。圖 21(b)、(c) 中，嘗試將擾動區域分為 2 至 3 個區域，分別計算這些區域的最大擾動後，系集成員發散的效果較使用 1 個區域的結果明顯，且有較多系集成員掌握到於印度洋地區對流增強的訊號，並於系統越過海洋陸地地區後系統強度較能維持。

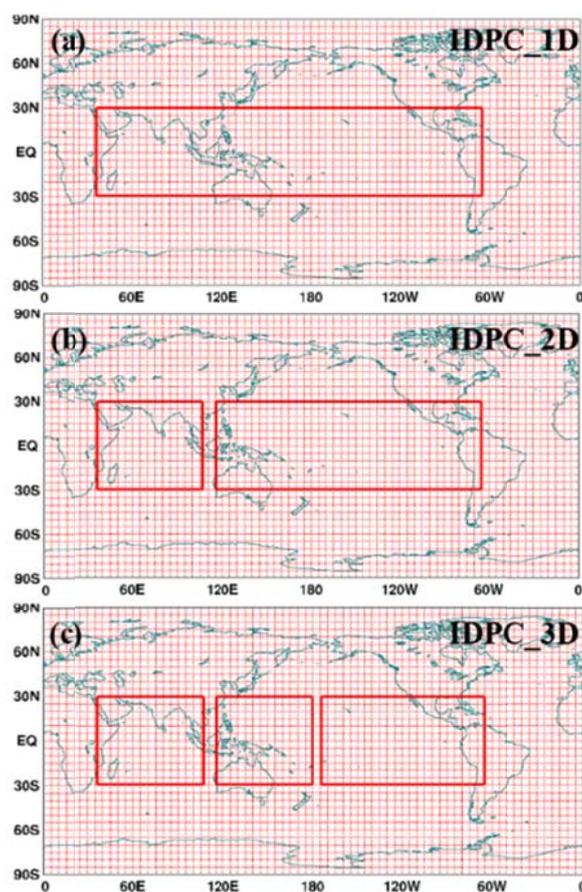


圖 20: 使用奇異向量技術於印度、太平洋地區進行初始場擾動之示意圖。範圍分別為(a)一個區域(40°E~60°W)、(b)兩個區域(40°E~110°E, 120°E~60°W)及(c)3 個區域(40°E~110°E, 120°E~180°E, 170°W~60°W)，區域南北範圍皆為 30°S~30°N。

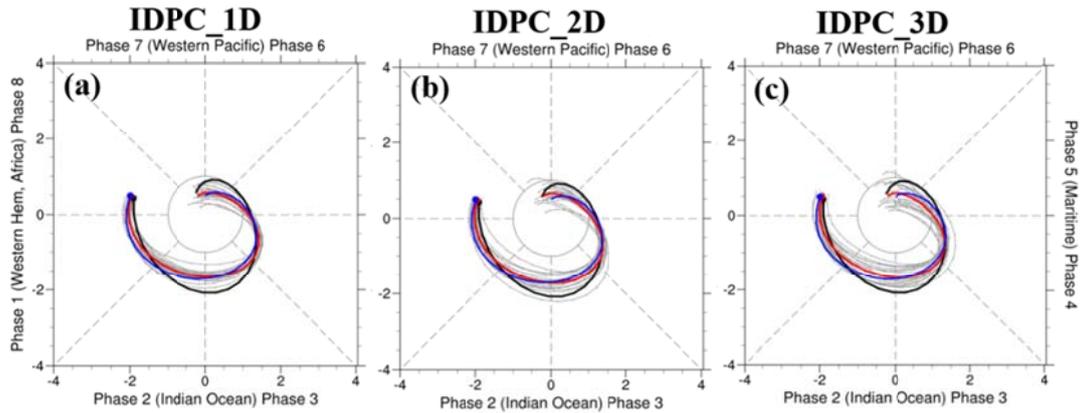


圖 21: MJO-2 事件期間的系集模擬實驗 MJO 指數相位圖。(a)為使用 1 個區域、(b) 2 個區域及(c)3 個區域的系集模擬結果。藍色實線為控制組實驗，紅色實線為系集成員平均的結果。

由濾波後的 OLR 距平場中(圖 22)，於系集預報平均的結果[圖 22(c)、(d)、(e)]，對流發展皆較控制組實驗強，負 OLR 距平極值達 $-35(\text{Wm}^{-2})$ ，且水平延伸的範圍較廣。將初始擾動範圍區分至 2、3 個區域後，隨著區域個數增加，於東印度洋海域 OLR 距平極值範圍越廣，呈現 MJO 對流系統於發展越旺盛，較接近於 NCEP 觀測，與 MJO 相位分析圖的結果一致(圖 21)，顯示將初始擾動區域增加，越能掌握熱帶地區的不確定性。

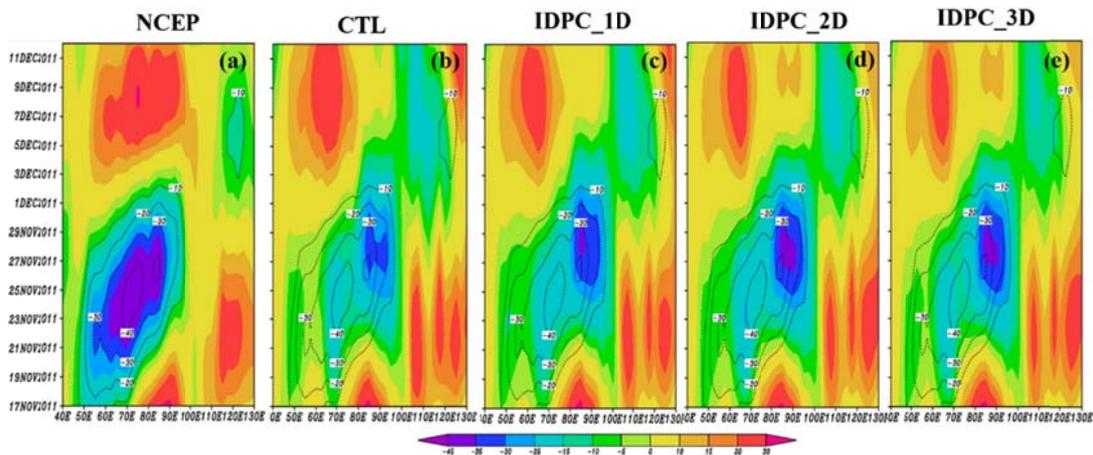


圖 22: 濾波後的 OLR 距平時序圖( $\text{Wm}^{-2}$ )。(a)NCEP 再分析資料，(b)CTL，(c)、(d)、(e)分別為印度洋、太平洋海域分為 1、2 及 3 個區域後進行初始場擾動的系集預報平均結果。虛線為 NCEP 再分析資料中，OLR 距平小於 $-10(\text{Wm}^{-2})$ 的等值線，間隔為 $10(\text{Wm}^{-2})$ 。

OLR 距平的相關係數時序圖中[圖 23(a)~(c)]，3 個系集模擬實驗的系集平均結果，6 至 7 天以前相關性與控制組實驗類似，於預報第 7 天之後，CTL 實驗的相關性下降至 0.5 以下，而系集平均則維持在 0.5 以上，呈現出系集模擬對於長期預報有較明顯的改進。而均方根誤差方面也有類似的結果[圖 23(d)~(e)]，於預報第 1 周內，各系集模擬實驗的系集平均 OLR 距平值誤差與控制組實驗類似，但於預報第 7 天之後，系集平均的誤差明顯較低。由圖 24 中，比較控制組及各系集平均的 OLR 距平相關性與誤差，呈現出將擾動區域增加後，各系集平均於

預報第 1 週的相關性及誤差有較好的表現。但若將擾動區域由 2 個增加至 3 個後，於預報第 11 天後，兩者系集平均的得分趨近於一致，對於兩週後長期預報的改善有限。

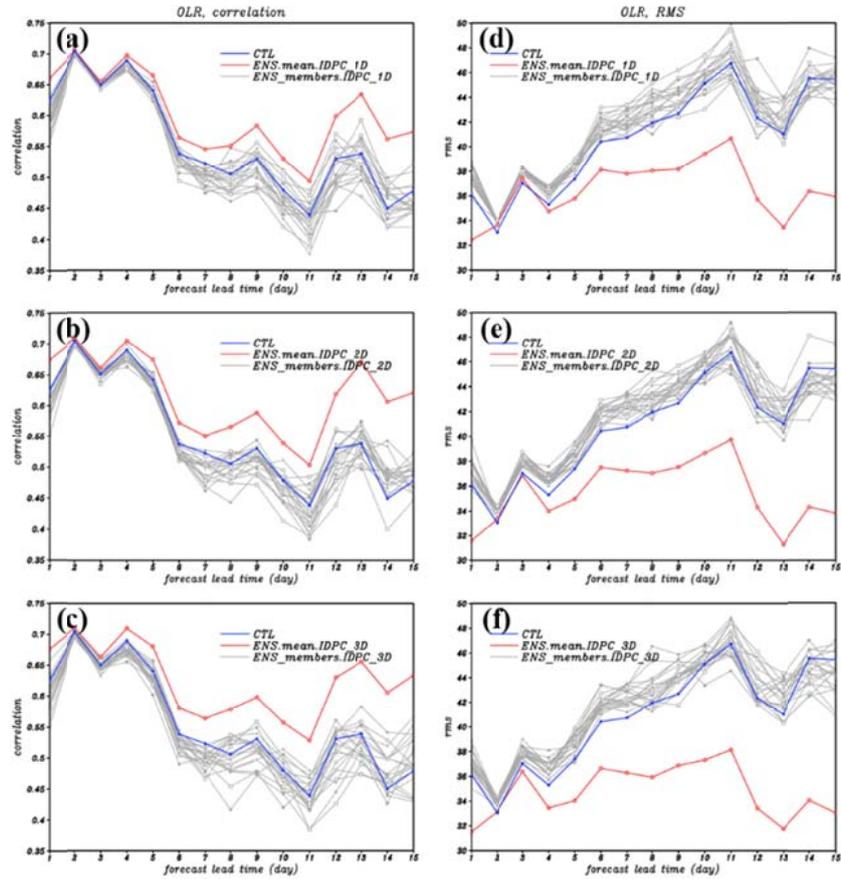


圖 23: NCEP 再分析資料與系集模擬實驗的 OLR 距平相關係數與均方根誤差。(a)、(b)及(c)分別印度洋、太平洋海域分為 1、2 及 3 個區域的系集預報實驗 OLR 距平相關係數，(c)、(d)和(e)則為 OLR 距平均方根誤差。藍線為控制組實驗，紅線為系集平均，而灰色線為系集成員。

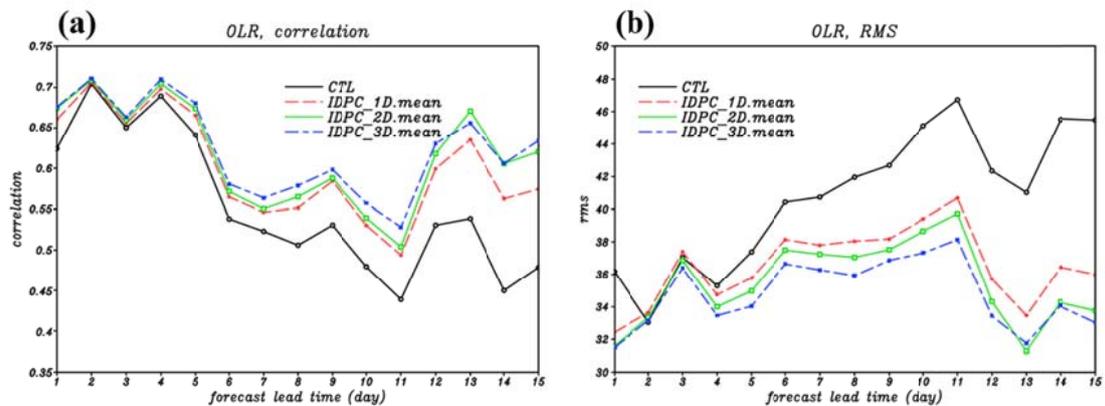


圖 24: 同圖 23。黑實線為控制組實驗，紅虛線、綠實線及藍線分別為將印度洋及太平洋海域分為 1 至 3 個區域進行初始場擾動的系集預報平均。

## 八、 參考文獻：

賴永鑫、曾建翰與陳建河，2014：奇異向量在全球波譜淺水模式颱風路徑系集預報的應用。 *大氣科學*，**42**，113-128。

Arakawa, A. and W. H. Schubert, 1974: Interaction of a cumulus cloud ensemble with the large-scale environment. Part I. *J. Atmos. Sci.*, **31**, 674–701.

Fu, Q., and K. N. Liou, 1992: On the correlated k-distribution method for radiative transfer in nonhomogeneous atmospheres, *J. Atmos. Sci.*, **49**, 2139-2156.

Fu, Q., and K. N. Liou, 1993: Parameterization of the radiative properties of cirrus clouds, *J. Atmos. Sci.*, **50**, 2008-2025.

Han, J., and H.-L. Pan, 2011: Revision of convection and vertical diffusion schemes in the NCEP global forecast system, *Wea. Forecasting*, **26**, 520–533.

Hong, S.-Y., and H.-L. Pan, 1996: Nonlocal boundary layer vertical diffusion in a medium-range forecast model. *Mon. Wea. Rev.*, **124**, 2322–2339.

Lin, H., G. Brunet, and Derome, J. (2008): Forecast skill of the Madden-Julian oscillation in two Canadian atmospheric models, *Mon. Wea. Rev.*, **136**:4130-4149.

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.

Tiedtke, M., 1993: Representation of clouds in large-scale models. *Mon. Wea. Rev.*, **121**, 3040–3061.

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.

Yoneyama, K., C. Zhang, and C.N. Long, 2013: Tracking pulses of the Madden-Julian Oscillation. *Bull. Amer. Met. Soc.*, **94**, 1871-1891.