出國報告 (出國類別:實習)

赴美國夏威夷大學國際太平洋研究 中心進行短期氣候預報技術研發

服務機關:交通部中央氣象局

姓名職稱:張美玉 技正

派赴國家:美國

出國期間:106年8月30日至10月31日

報告日期:107年1月12日

摘要

本次出國目的,主要是透由與夏威夷大學國際太平洋研究中心研究團隊之交 流學習,利用中央氣象局全球模式(簡稱GFS),進行季內振盪(Madden-Julian Oscillation,簡稱 MJO)的模擬與研究,一方面評估GFS對於MJO的預報能力,另 一方面,透過此評估,了解GFS動力及物理過程改進的方向,以期增進GFS對於 MJO的預報能力,提升氣象局短期氣候之預報技術。

由模擬結果發現,GFS在2周內的預報,不管採用Tiedtke scheme或NSAS scheme均能夠模擬出MJO的向東傳播;超出2周以上的預報,GFS採用Tiedtke scheme有較佳結果。

利用氣柱垂直積分濕靜能的能量收支方程診斷,發現 Tiedtke scheme 較能 掌握與濕靜能時間變化率相關的垂直及水平濕靜能平流、輻射及可感熱變異量 之東西不對稱性,即掌握控制對流發展的垂直速度和水平運動之非絕熱加熱結 構的緯向分佈(Wang et al., 2017)。對於 MJO 的肇始,GFS 偶合 SIT 海洋模式的 模擬結果顯示,海溫的正變異量對於隨後發展 MJO 的對流有很好的相關。在 MJO 肇始前,低層的水氣、東風及垂直速度的正變異量均增加,此與 Li et al. (2015)在 DYNAMO 實驗期間的 MJO 個案診斷結果相近。

關鍵詞:季內振盪(Madden-Julian Oscillation,簡稱 MJO)

目次

| 一、目的・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ | •••••• |
|--|--------|
| 二、過程 • • • • • • • • • • • • • • • • • • • | |
| 三、心得與建議・・・・・・・・ | |
| 参考文獻・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ | |
| 附圖(表) ・・・・・・・・・ | |

一、目的 :

季內振盪 (Madden-Julian Oscillation,簡稱 MJO) 為一發生於熱帶赤道區之大 氣擾動,具有大尺度環流和深對流偶合之特徵,由觀測的資料可見為一緩慢向東 移行的行星尺度大氣波動,其週期約10~90天,屬季節內尺度。由於MJO對於天 氣和氣候現象(如季風,ENSO,颱風,中緯度天氣)具有重大影響且彼此相互 作用,因此MJO 被視為影響熱帶大氣季節內變化的最重要機制之一,並為短期 氣候預報之最重要可預測來源。

儘管MJO在氣候和天氣系統中扮演重要角色,但目前全球氣象研究及作業單位的全球預報模式(GCM)在預報及展現這個現象方面仍存在著一些缺陷。由於準確的模擬與預測MJO,將有助於改善季節內尺度的短期氣候預報,從而彌合天氣預報與氣候預測之間的差距,因此,改進MJO的模擬與預報為現今學界與全球氣象作業中心所關注與研發的重點之一。

職本次出國的目的,主要是透由與夏威夷大學國際太平洋研究中心 (International Pacific Research Center, IPRC)研究團隊之交流學習,利用中央氣象局 (以下簡稱氣象局)全球模式,進行 DYNAMO 觀測實驗期間 MJO 個案的模擬與評 估,一方面透過此模擬評估,了解目前氣象局全球作業模式對於 MJO 的掌握能 力,另一方面,透過不同物理參數化方法的展期模擬,及其預報效能與潛勢評估, 了解模式未來改進的方向。此外,並嘗試探討 MJO 的肇始和傳播之物理過程, 以期未來能更精確掌握 MJO 系統之演變過程,以增進氣象局短期氣候之預報技 術與能力。其重要效益包括:(1)透過此交流學習,瞭解及掌握國際研究機構 對季風、聖嬰現象、季內振盪等議題之預報技術與研發重點,以增進氣象局對氣 候監測及預報之未來發展趨勢的掌握與短期氣候預報能力的提升;(2)藉由此交

4

流機會與國外氣候研究人員進行交流、相互學習,有助於氣象局與國際氣候研究 單位之國際交流推展與合作。(3)藉由國際技術交流與合作研發,期望增進氣象局 全球模式及短期氣候預報之技術與能力,以提供政府與民間相關單位較佳的短期 氣候預報指引,減緩天然災害所帶來的影響,保障人民的生命和財產安全。 二、 過程:

此次赴美行程及工作内容如下表 :

| 日期 | 地點與相關工作內容 | | | | | |
|-----------------|--|--|--|--|--|--|
| 106/08/30 | 臺北→美國夏威夷州檀香山市 | | | | | |
| 106/08/31-10/29 | 1. 與夏威夷大學國際太平洋研究中心(International Pacific | | | | | |
| | Research Center, IPRC) 李天明教授、王斌教授之研究團隊交流 | | | | | |
| | 學習,利用氣象局全球模式,進行MJO肇始及傳播物理過程 | | | | | |
| | 的模擬與研究,工作內容包括: | | | | | |
| | (1) 建置測試環境及相關script file新增及修改。 | | | | | |
| | (2) 設計及建置MJO相關診斷工具程式。 | | | | | |
| | (3) 修改模式流程、撰寫及建置新增氣候診斷輸出程式於氣象 | | | | | |
| | 局模式。 | | | | | |
| | (4) 進行6組不同初始時間30-45天積分測試。 | | | | | |
| | (5) 進行2組不同積雲參數化物理過程117天積分測試。 | | | | | |
| | (6) 進行不同實驗組測試結果之診斷評估。 | | | | | |
| 106/10/30-10/31 | 美國夏威夷州檀香山市→返回臺北 | | | | | |

I. 美國夏威夷大學國際太平洋研究中心簡介

美國夏威夷大學國際太平洋研究中心(The International Pacific Research Center, IPRC)為一國際性的氣候研究中心,此機構於 1997 年 10 月, 在夏威夷大學與日本海洋科學技術中心(Japan Marine Science and Technology Center)及日本國家太空發展局(National Space Development Agency of Japan) 所簽訂的合作協定下成立。該中心位於夏威夷大學馬諾(UH Manoa)海洋與地球科 學與技術學院(SOEST)內,目前由夏威夷大學(UH)與日本海洋 - 地球科學技術局(JAMSTEC)之合作協議支持維運。IPRC 的主要研究範圍在亞太地區, 其研究重點之一為透過數值模式模擬和診斷研究,以瞭解熱帶地區的關鍵天氣現象,如海洋-大氣系統的 El Niño-南方振盪、季風環流、印度洋區域的年際變化、季 內振盪(MJO)和熱帶氣旋等現象及其對於氣候之影響。

職本次赴夏威夷大學國際太平洋研究中心(International Pacific Research Center, IPRC)的研習任務,主要將與李天明教授及王斌教授之研究團隊合作,利用氣象局全球模式,進行MJO個案之模擬與評估,以期了解氣象局全球模式對於MJO的預報能力與預報特性,並評估模式動力及物理過程改進的方向,以期增進全球模式對於MJO的預報能力,提升氣象局短期氣候之預報技術。

II. 模式簡介與 MJO 個案之模擬評估:

(一) 模式簡介

中央氣象局全球模式(CWBGFS_T511L60)為一波譜模式,水平解析度約 25 公 里,垂直方向為 60 層,所採用的物理參數化方法如表 1。海洋模式為結合雪、 冰及水體(Snow/Ice/Thermocline)三相的 SIT 一維海洋模式,可處理海水、冰及雪 之能量交換,其針對海洋表面溫度變化所發展的溫度能量傳輸模組,可進行海洋 表層之溫度預估(Tsuang et al., 2001; Tu and Tsuang 2005; Tsuang et al., 2009)。SIT 模 式主要處理全球模式赤道至南北緯 30 度以內的海溫預估,水平網格與大氣模式 相同,垂直層分布如表 2,垂直方向共 30 層,深度約 200 公尺。利用 SIT 模組之 海氣交換模擬技術,期望可增進氣象局全球模式的下邊界的預報技術。

(二) 實驗說明與診斷評估

2011年10月至2012年3月,在印度洋赤道地區舉行了一個多國參與的聯

合觀測實驗計畫,稱為 DYNAMO(Dynamics of the Madden-Julian Oscillation)實驗,在 2011年的觀測期間,發生了兩次強烈的 MJO 事件,分別稱為 MJO-1(10 月中旬至 11 月中旬)及 MJO-2(11 月中旬至 12 月中旬),以下實驗將針對 DYNAMO 期間之 MJO-1及 MJO-2 個案進行模擬,並將模擬結果與 ERA 重分析 資料(ERA-Interim, Dee et al., 2011)進行校驗評估。

(1) 實驗1:

利用氣象局全球模式並選用其中 Tiedtke 積雲參數化方法,分別以 2011 年 10月5、10、15日及11月5、10、15日0時(UTC)6組不同初始時間個案,進 行30-45天之展期積分模擬,並將大氣變量分離為三種不同尺度之分量,包括大 氣之平均狀態、MJO尺度和更高頻率運動尺度之分量,以進行診斷評估。本研 究所採用的濾波方法乃利用大氣變量之30日滾動平均為大氣之平均狀態,視為 60天以上的大氣尺度分量,大氣變量之5日平均為大氣變數總量減去較高頻分 量,視為濾去10天以下高頻大氣擾動的分量,因此,以5日滾動平均減去30 日滾動平均之差為10-60日 MJO尺度之大氣擾動分量,為MJO尺度之變異量 (anomaly),以下將以此濾波方式所計算的MJO尺度變異量(anomaly),進行 MJO 預報表現的診斷評估。

圖 1 為 ERA 重分析資料與 2011 年 10 月 5、10、15 日不同初始時間所模擬 的(南北緯 5 度平均)OLR(Outgoing Longwave Radiation,大氣層頂的外逸長波輻 射)變異量之時序圖,方框內為經濾波後的模擬結果,方框外為 ERA 重分析資料 濾波結果,模擬結果顯示,採用 Tiedtke 積雲參數化方法,對於不同初始時間個 案,全球模式對於 MJO-1 的模擬,均呈現東傳訊息;對於初始時間在 MJO-1 肇 始前較久時間的個案,如 10 月 5 日個案,MJO-1 對流模擬偏弱,傳播速度亦模 擬較差;模式初始時間在較接近 MJO-1 肇始的個案,MJO-1 的模擬強度較強, 傳播速度及位置也較接近重分析資料結果。 圖 2 為 ERA 重分析資料與 2011 年 11 月 5、10、15 日不同初始時間所模擬 的(南北緯 5 度平均)OLR 變異量之時序圖。模擬結果顯示,模式初始時間為 11 月 5、10 日個案,對流模擬偏弱,系統傳播亦較為紛亂;模式初始時間為 11 月 15 日個案,MJO-2 對流模擬較強,有明顯東傳訊息。整體而言,愈接近 MJO-2 肇始時間的預報,MJO-2 的模擬愈佳,對於對流模擬較佳的個案,模式有預報東 傳的模擬能力。

(2) 實驗 2:選擇 2011 年 10 月 1 日 00 時(UTC)個案,分別使用 Tiedtke 和 NSAS 積雲化方法進行 107 天積分模擬,以了解氣象局全球作業模式對於 MJO 的季預 報能力。

由於 MJO 為大尺度的積雲對流系統,我們將考慮積雲在大尺度運動系統中的集合效應,利用大尺度水氣、大氣質量與能量守恆相關的熱力與連續方程,推導大氣垂直積分氣柱濕靜能(Moist Static Energy)能量收支方程組(1) (Neelin and Held, 1987),以探討 MJO 在熱帶地區肇始與傳播等物理過程。方程組如下:

$$\left\langle \frac{\partial MSE}{\partial t} \right\rangle = -\left\langle u \frac{\partial MSE}{\partial x} \right\rangle - \left\langle v \frac{\partial MSE}{\partial y} \right\rangle - \left\langle \omega \frac{\partial MSE}{\partial p} \right\rangle + \left\langle Q_{R} \right\rangle + SH + LH$$

$$= -\left\langle u \frac{\partial MSE}{\partial x} \right\rangle - \left\langle v \frac{\partial MSE}{\partial y} \right\rangle - \left\langle \omega \frac{\partial MSE}{\partial p} \right\rangle + \left\langle SW \right\rangle + \left\langle LW \right\rangle + SH + LH$$

$$= -\left\langle u \frac{\partial MSE}{\partial x} \right\rangle - \left\langle v \frac{\partial MSE}{\partial y} \right\rangle - \left\langle \omega \frac{\partial MSE}{\partial p} \right\rangle + \left\langle Q_{clr} \right\rangle + \left\langle Q_{cld} \right\rangle + SH + LH$$

$$(1)$$

其中 MSE 為濕靜能, MSE=C_pT+L_vq+gz, C_p為定壓下比熱(=1004 JK⁻¹kg⁻¹)、T 為溫度、L_v為凝結潛熱(=2.5*10⁶ Jkg⁻¹)、q 為比濕、g 為重力加速度(=9.8 ms⁻²), z 為高度。<>表由地表向上的氣柱垂直積分,方程式等號左邊 $\left\langle \frac{\partial MSE}{\partial t} \right\rangle$ 為氣 柱濕靜能的區域隨時間變化率,等號右邊第一項為氣柱濕靜能之東西向水平 平流貢獻,第二項為南北向水平平流貢獻,第三項為垂直平流貢獻項, $\langle Q_R \rangle$ 為氣柱內總輻射貢獻,SH 為地表可感熱通量貢獻,LH 為地表潛熱通量貢 獻;另外, $\langle SW \rangle$ 為氣柱內短波輻射貢獻, $\langle LW \rangle$ 為長波輻射貢獻, $\langle Q_{clr} \rangle$ 為 晴天之輻射貢獻, $\langle Q_{cld} \rangle$ 為雲的輻射貢獻效應。

由於 OLR 與對流降水有很好的相關(如圖 3),此外由水氣比濕(等值線)和濕 靜能變異量(anomaly)的垂直剖面圖與時序變化圖可見 MJO 系統的水氣和濕靜能 的變化有很好的相關(如圖 4),因此本研究將透過大氣 OLR、濕靜能及水氣的發 展與變化,了解 MJO 系統的發展與傳播。

由圖 5 未濾波之 OLR(南北緯 5 度平均,向上為負值)時序圖顯示,全球模式 採用 Tiedtke scheme,其 3 個月(92 天)的模擬結果有相當好的表現,在這段 DYNAMO 實驗期間,有 4 個主要的東傳對流系統,Tiedtke scheme 對於對流強 度的模擬,呈現偏強的預報,但對於東傳的訊息有很好的掌握。比較 NSAS scheme 的模擬,其對於 10 月中旬前的對流系統,有不錯的模擬,並顯示東傳的訊息, 但對於其後的對流系統,則顯示偏弱的模擬,東傳的訊息也沒有很好的掌握。評 估濾波後 OLR 的模擬結果,Tiedtke scheme 和 NSAS scheme 對於前 15 天(2 週內) 的模擬,都有不錯的表現,雖然兩者對流的預報均偏強,但都掌握東傳的訊息。 對於 15 天後的預報,Tiedtke scheme 對於 MJO-1 及 MJO-2 的模擬,在 10 月及 11 月中旬左右,有一比 ERA 重分析資料結果偏強的副對流系統發展,且有東傳 的現象,其後又有一更近似 MJO-1 及 MJO-2 的主對流系統發展並東傳,但強度 較重分析資料為弱,發展的時間較晚,移動速度較慢。比較 NSAS scheme 之模 擬,其對於 MJO-1 的模擬強度偏弱,東傳的訊息也較不連續,其後對於 MJO-2 的模擬,則較無可提供預報參考的資訊。

對於 MJO-1 及 MJO-2 肇始時間的診斷,依據 Li et al.(2015),其分析 MJO 肇 始區內 OLR 變異量,當其由正值轉為負值的時刻定為 MJO 肇始的時刻,依此分

析分法,定為 2011 年 10 月 14 日及 11 月 14 日。由圖 6 水氣場重分析資料與模擬結果比較,Tiedtke scheme 對 MJO-1 之肇始時間模擬接近重分析資料,但系統中低層水氣分布稍弱,水氣在 700-500hPa 之極大值偏弱,位置偏高,系統持續時間偏短;對於 MJO-2 之模擬,其肇始時間提前,於 11 月 14 日前後,低層 有較強水氣供應,但未能發展成夠強勁的深對流,其後於 11 月下旬,另有一深 對流系統發展,其較近似 MJO-2 系統,但時間偏晚,強度亦偏弱。NSAS scheme 之水氣模擬,則普遍偏弱,水氣傳輸侷限於 500hPa 以下,其 MJO-1 發展微弱, MJO-2 期間則無深對流系統發展。

由東西向水平風場模擬評估,Tiedtke scheme 於 MJO-1 肇始前及對流中心 到達前為東風變異量,其後則為西風變異量,與重分析資料結果相近,但之後的 西風變異量偏強, 西風變異量厚度偏深;在 MJO-2 期間,模擬的東風變異量偏 弱,由水氣平均背景場顯示(圖 7),在此區東邊,有較高的水氣含量,東風變異 量偏弱,可能是造成此區水氣供應不足的原因,而導致 MJO-2 發展偏弱,MJO-2 對流中心後的西風變異量亦比分析為弱。在 Tiedtke scheme 的模擬,低層西風變 異量的厚度偏厚,使高層的東風變異量範圍變小,在中層東西向的水平風切變 小,可能造成 MJO 的高低層環流位置配置不佳,進而影響 MJO 之發展與傳播。 NSAS scheme 之東西向水平風場模擬,則是東風偏弱, 在 MJO-2 期間,中低層 多為西風變異量,因此 MJO 系統發展困難。

由圖 8 南北向水平風場之重分析資料發現,在 MJO 肇始及發展期有南風變 異量,由 Tiedtke scheme 與 NSAS scheme 的模擬亦發現,在 MJO-1 與 MJO-2 期間,對流肇始前及對流中心到達前均有南風變異量,其後為北風變異量,由於 南風變異量與水氣變異量有很好的相關,因此南風變異量的出現可能是 MJO 系 統或熱帶地區對流系統發展或肇始一個重要的訊息。

11

比較垂直速度場的分析與模擬結果發現,Tiedtke scheme 的垂直速度模擬過強,尤其是 MJO 發展中後期低層與高層,過強的上升速度,可能會使低層的水氣太有效率地輸送至高層,產生凝結降水,使得低層水氣快速消耗,進而影響 MJO 對流發展的持續性,如 MJO-1 的模擬,對流的維持時間較短;此外,其後過強的下降運動,將使低層下降區變乾,亦將影響 MJO 系統的維持或影響下一個 MJO 對流系統的發展。由 NSAS scheme 垂直速度場模擬,在 MJO-1 發展的中後期中高層,亦有過強的上升速度,對於後續對流發展偏弱,亦可能有所影響。

由圖9雲水及雲冰混和比的分析與模擬結果顯示,Tiedtke scheme 過強的垂 直速度,造成在 500hPa 以上,有過強、過高的中高雲發展,此外在 850hPa 以 下的低雲則明顯缺乏。NSAS scheme 有高雲和低雲的發展,但高雲仍偏多,低雲 偏少。比較溫度場之重分析與模擬結果可見,Tiedtke scheme 在 MJO-1 肇始前, 有模擬出肇始前的低層增溫,其高層則可能因過強的上升速度,使水氣凝結潛熱 釋出而過暖。NSAS scheme 則未模擬出肇始前的低層增溫,但高層亦預報偏暖, 因為亦有過強的垂直上升速度。

由圖 10 濕靜能變異量時序圖可見,濕靜能變異量與水氣變異量相關性很高,尤其是中低層,Tiedtke scheme 對 MJO-1 的模擬稍弱,對 MJO-2 的模擬則 偏弱,且發展出2個較弱的對流系統;NSAS scheme 則對於 MJO-1 及 MJO-2 均 偏弱,對流強度不足且只侷限於中低層,均未達 500 hPa 以上。由 ERA 重分析 之濕靜能隨時間變化趨勢可見,在 MJO 肇始前及達對流發展最強期前,濕靜能 隨時間變率為正值,即濕靜能強度隨時間增強,其最大值在 400-700hPa 高度間, 顯示深對流發展很高,之後漸轉為負值,即濕靜能減弱,對流漸衰弱。比較 Tiedtke scheme 的模擬,其濕靜能變化率亦隨對流發展由正轉負,對流深度可達中高層, 但強度不足;NSAS scheme 的模擬,其濕靜能變率較弱且侷限於中低層,對流 發展強度及深度發展均不足。 由 ERA 重分析之濕靜能水平平流變異量時序圖(圖 11)可見,東西向的濕靜 能水平平流變異量在 MJO 肇始前及對流發展前期之中低層有正貢獻,其最大值 在 700 hPa 高度附近;南北向濕靜能水平平流變異量則在對流發展中期後亦會有 正貢獻,如 MJO-1 個案對流發展中期後中低層的正貢獻,對於對流的維持可能 有正面助益。評估 Tiedtke scheme 的模擬,其東西向的濕靜能水平平流變異量模 擬偏弱,但南北向的濕靜能水平平流變異量模擬偏強,尤其在低層;NSAS scheme 的模擬,其東西向的濕靜能水平平流變異量模擬偏弱,南北向的濕靜能水平平流 變異量模雖偏強,但高度甚低。

由濕靜能垂直平流及非絕熱加熱(輻射、潛熱及可感熱)貢獻項之變異量時序 圖(圖 12)顯示,濕靜能垂直平流於 MJO-1 及 MJO-2 系統肇始前,於 700hPa 以下 中低層均有一致的正貢獻,此對於 MJO 系統的肇始有其重要性。此外,在 MJO 對流系統活躍期,在700hPa以下,有正的濕靜能垂直平流變異量,其上層為負 值,而在對流不活躍期則相位相反。此乃因對流系統低層的垂直上升速度,將把 低層的水氣向上傳送,如此將增強中低層之濕靜能(水氣),但對於凝結層以上的 中高層,則因水氣凝結(降水),使大氣中水氣及濕靜能減低;另外,對於非對流 區而言,其中高層可能因下降運動造成雲水(雲冰)之蒸發,使濕靜能(水氣)增加, 低層則因下降運動的絕熱增溫使大氣變得更乾,而使濕靜能(水氣)減弱。此外, 非絕熱加熱(輻射、潛熱及可感熱)總貢獻項,則與濕靜能垂直平流項呈現相反的 相位,此原因包括雲對輻射的吸收與反射效應,如低層雲反射短波輻射,造成低 層大氣的冷卻,高層雲攔截長波輻射,造成高層大氣的增暖;以及水氣凝結放熱 亦造成高層大氣的增暖等多項因素,使得非絕熱加熱(輻射、潛熱及可感熱)貢獻 項與濕靜能垂直平流項在對流系統中呈現相反的相位,低層為負值,高層為正 值。比較 Tiedtke scheme 的模擬,其對流系統發展的尺度小,但垂直平流變異量 及非絕熱加熱貢獻項模擬的強度偏強; NSAS scheme 的模擬比 Tiedtke scheme 模擬結果偏弱,且侷限於低層。

由圖 13 ERA 重分析資料的水氣變異量緯向剖面變化可見,在 MJO-1 肇始 前的 10 月上旬,在東經 60-90 度間的印度洋區為水氣的負變異量區,此時大氣 偏乾,此後於 10 月 15 日 MJO-1 肇始後,在印度洋低層有水氣的正變異量發展, 10 月 20 日,對流系統有相當強勁的發展,水氣變異量之正區範圍由東經 50 度 向東延伸到 130 度,對流深度由東經 130 度的 925hPa 向西遞增到 400hPa 的深 度,此時最強的水氣變異量區在東經 60 度左右,其後,MJO-1 系統東移,10 月 25 日,水氣變異量最強區移至東經 70 度,11 月 1 日,繼續東移至東經 90 度附 近。

Tiedtke scheme 的水氣模擬,則於 10 月 10 日在印度洋區低層有零星的對流 發展,至 10 月 15 日,在東經 60-110 度區域,有一比重分析資料偏強的對流發 展起來,在東經 70 度附近有一較強的對流中心,深度約 700 hPa 左右,至 10 月 20 日,此對流中心移至東經 95 度,同時在東經 60 度附近的對流繼續發展,10 月 25 日,此較弱的對流中心繼續東移至東經 120 度附近,11 月 1 日,此對流系 統漸衰弱消散,但原在東經 60 度附近的對流系統東移至 80 度附近,比 MJO-1 東移時間較晚,其強度亦偏弱。

比較 NSAS scheme 的模擬,其對流同樣提前發展,但此對流系統很難發展 成深對流,10月20日,有較強的對流中心移至東經70度附近,深度達700hPa, 但此後向東發展的對流僅發展至850hPa高度,整體而言,NSAS scheme 對 MJO-1 之模擬明顯偏弱。

由 ERA 重分析資料顯示(圖 14), MJO-1 在 11 月 5 日已東移至東經 110-120 度間,但強度減弱,之後於 11 月 10 日,系統再東移至東經 150 度,此時低層水 氣供應減弱,在東經 50-150 度間,水氣變異量為負值,同時為西風變異量區, 乾燥區及西風變異量區由西向東逐漸擴展。此後於 11 月 15 日 MJO-2 肇始後, 在東經 50-70 度間低層有水氣的正變異量發展,11 月 20 日,MJO-2 系統發展增強,水氣變異量正區範圍由東經 50 度向東延伸到 160 度,對流深度可達 400hPa,此時最強的水氣變異量區在東經 50-60 度間,其後,MJO-2 系統東移,11 月 25 日,強水氣變異量區移至東經 60-90 度間,之後到 12 月 1 日,對流快速減弱,對流中心東移至東經 100-110 度附近。

Tiedtke scheme 模擬的弱對流系統在 11 月 5 日東移至東經 90-100 度附近, 11 月 10 日,此系統持續減弱並東移至 110-120 度間;同時,在東經 50-80 度間 有新的對流系統發展,與重分析資料接近,但發展區域較寬,強度較弱。在 11 月 15 日 MJO-2 肇始後,東經 50-70 度間低層,有水氣的正變異量發展,11 月 20 日,MJO-2 築統向西移動至東經 40-50 度間,並另於東經 90-100 度附近有新 的對流發展,由於 Tiedtke scheme 在 60-90 度間,缺乏低層水氣供應,使 Tiedtke scheme 所模擬的 MJO-2 系統斷裂成 2 段,在 11 月 25 日,可見東段系統快速向 東發展移動並消散,其對流強度偏弱。西段系統亦減弱,在 12 月 1 日,對流中 心東移至東經 70 度附近。一般而言,NSAS scheme 模擬的對流系統,類似熱帶 的淺對流系統,在原處生長發展及消散,或短距離的東西移動,未具有 MJO 系 統東傳的特徵性。

由濕靜能從地表垂直積分至 100hPa 之氣柱的濕靜能(Moist Static Energy)能量收支方程組(1),利用方程組等號左邊的濕靜能區域隨時間變化率,以及等號右邊的各貢獻項,探討 MJO 向東傳播的物理機制。

由地表垂直積分到 100hPa,南北緯 5 度區域平均的濕靜能區域隨時間變化 率、濕靜能東西向水平平流、南北向水平平流及垂直平流變異量之緯向時序圖(圖 15)可見,ERA 重分析結果顯示,濕靜能區域隨時間變化率有東傳訊息,即濕靜 能最強增加趨勢將隨時間向東傳輸,顯示對流中心亦將東傳;比較水平平流及垂 直平流的貢獻表現顯示,垂直平流項的貢獻較大且東傳信息一致性高,此外水平 平流在在東經 140 度以西主要為東傳貢獻,在 140 度以西則常有西傳的貢獻。 比較 Tiedtke scheme 的模擬結果,其濕靜能區域隨時間變化率有東傳訊息,但強 度較重分析結果弱、分支較多,亦有零星西傳訊號;垂直平流項有類似濕靜能區 域隨時間變化率的東傳表現,其水平平流的東傳訊號及貢獻較為凌亂。比較 NSAS scheme 的模擬結果,其濕靜能區域隨時間變化率,在 MJO-1 時期,於東 經 80 度以東有東傳訊息,之後東傳訊息並不明顯。垂直平流及東西項水平平流 貢獻有較明顯西傳貢獻,南北項水平平流則有較明顯東傳貢獻。

由 ERA 重分析資料之地表溫度(洋面上為海溫)、潛熱及可咸熱變異量之緯 向時序分析(圖 16)可發現,在 2011 年 10 月初至 12 月中旬,於東經 50-70 度印 度洋上 MJO 肇始區,在 MJO-1 及 MJO-2 肇始前後,海溫、潛熱及可咸熱有較 強的正變異量發生,其中海溫正變異量發生時間較早,潛熱及可咸熱正變異量則 發生較晚。此外,印度洋面上海溫、潛熱及可咸熱變異量,主要有三個東傳的正 變異量訊號。其中海溫最早,第一個東傳訊息發生於 MJO-1 肇始前 10 月上旬至 中旬,在一個東傳的淺對流系統發生前,此次東傳的海溫正變異量的強度略強; 第二個訊息發生於 10 月中旬至下旬的 MJO-1 對流發生前,此次東傳的海溫變異 量強度積弱,第三個訊息發生於 11 月中旬至下旬的 MJO-2 對流發生前,海溫變 異量強度最強;潛熱及可感熱變異量三個東傳的正變異量訊號則發生於 MJO-1 肇始前的淺對流發展前期,此時潛熱及可感熱正變異量強度較弱;第二個訊息發 生於 MJO-1 對流活躍期,強度次強,第三個訊息發生於 MJO-2 對流活躍期,其 強度最強。潛熱與可感熱正變異量的強度分布與 OLR 負變異量有很好的相關, 即對流越強,潛熱及可感熱正變異量強度越強,並於對流中心有極大值。

比較 Tiedtke scheme 模擬,在上述期間,於印度洋上東經 50-70 度的 MJO 肇始區,在 MJO-1 及 MJO-2 肇始前,海溫、潛熱及可感熱亦有較強的正變異量

16

發生,但強度較 ERA 重分析資料結果為弱。比較印度洋面海溫、潛熱及可感熱 之正變異量訊號, Tiedtke scheme 則有四個東傳的正變異量訊號。其中海溫正變 異量同樣發生最早,第一個東傳訊息發生於 MJO-1 肇始前的 10 月上旬至中旬, Tiedtke scheme 所模擬的海溫正變異量,在東經 100 度以東,其強度較 ERA 重 分析資料結果強,則可能是造成後續對流於東經100度以東有偏強發展的原因; 之後,第二個模擬的海溫變異量在90度以西為負,可能使得10月中下旬模擬的 對流系統,其開始發展較為微弱;第三個正海溫變異量訊息發生於 11 月上旬至 中旬,此正變異量發展時間較較早,但在東經 90 度以西強度偏弱,使系統肇始 亦偏弱;最後發生於11月中下旬的正海溫變異量訊號,其強度同樣偏弱,之後 的對流亦相對偏弱。可感熱正變異量的模擬類似海溫變異量有四個東傳訊息,四 個東傳的正變異量分布與較的正海溫變異量與負 OLR 變異量有很好的相關,即 與對流的發展及海溫的增溫有很好的相關性。此外,第一個東傳的正潛熱變異量 發生於第一個東傳對流發展前,與第一個東傳的海溫正變異量有很好的相關,此 後,潛熱正變異量的大值多發生於東經 50-70 度的對流肇始區及較強對流中心的 前後,但潛熱正變異量東傳訊號較不明顯。由於潛熱變異量極大值遠大於可感熱 正變異量, Tiedtke scheme 所模擬的潛熱變異量極大值又多發生於對流肇始前 後,故此項對於 MJO 肇始的發生有重要的影響。比較 NSAS scheme 的模擬,在 上述期間,可見3個两傳的海溫正變異量訊息,此後,有對流的發展,而地表潛 熱、可感熱正變異量亦發展出類似海溫正變異量的西傳訊號。

由氣柱的晴空短波輻射效應與濕靜能的分布(圖 17)發現,兩者有很好的相關 性,由於在晴空狀況下,短波輻射主要受水氣之影響,故氣柱晴空的短波輻射效 應與濕靜能(水氣)分布有很好的相關,比較 Tiedtke scheme 及 NSAS scheme 亦有 類似的模擬結果。此外,比較雲的短波輻射、晴空的長波輻射及雲的長波輻射等 效應的正變異量發現,上述輻射的作用與 OLR 負變異量的分布(圖 17)有很好的 相關,其中又以雲的長波輻射作用之正變異量值為最大,因此,輻射的作用項與 MJO 對流發展趨勢一致, Tiedtke scheme 模擬結果與 ERA 重分析資料結果相似, 有東傳訊息; NSAS scheme, 其輻射效應則向西傳。

由以上濕靜能隨時間變化率的各貢獻項分析顯示,影響 MJO 東傳的貢獻項 包括 ERA 重分析資料所計算的所有貢獻項,Tiedtke scheme 所模擬的垂直平流、 可咸熱、輻射項、東西向及南北向水平平流、潛熱貢獻的部分時段,NSAS scheme 所模擬的所有貢獻項之小部分時段;反之,影響 MJO 西傳的貢獻項,包括 Tiedtke scheme 所模擬的東西向、南北向水平平流及潛熱貢獻的部分時段,NSAS scheme 模擬的所有貢獻項之大部分時段。一般而言,在任一東傳的正變異量時序圖中, 均可發現在未來的一段時間,所檢視系統的東邊,有較大的正變異量區,其西邊 則是較小正變異量區,顯示 MJO 系統之東邊未來有較大的正變異量區,其西邊 現。其西邊有較大的正變異量區,東邊有較小正變異量區,顯示 MJO 系統之西 邊未來有較大的正變異量區,東邊有較小正變異量區,顯示 MJO 系統之西 邊未來有較大的正變異量變化趨勢,故系統西傳。由 ERA 重分析資料及 Tiedtke scheme 模擬結果所計算的濕靜能區域隨時間變化趨勢顯示,Tiedtke scheme 之 模擬結果與 ERA 重分析資料分析結果相似,可模擬出 MJO 東傳訊息,但強度 較弱,因 Tiedtke scheme 有西傳的貢獻項,且東傳的貢獻亦較弱;反之,NSAS scheme 多是西傳的貢獻項,因此系統西傳。

18

三、心得與建議

雖然氣象科技的發展持續新進,但全球暖化所帶來的極端天氣加劇、旱澇頻 仍、酷暑與嚴寒季節交替等天候現象,卻更加深全世界各國氣象及政府有關單位 對長期氣候預報之迫切需求,各國政府在氣候變遷的衝擊下,皆期望獲得更多實 用性的氣候預報資訊,以因應未來即將面臨的相關挑戰與衝擊。由 IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) AR5 (the Fifth Assessment Report)最 新報告顯示,動力預報模式的預報產品仍是目前最具有預報能力之氣候預報資訊 來源;此外,由實際業務面考量,如中央氣象局(簡稱氣象局)長期預報單位在進 行月、季等展期預報時,亟需取得長期且良好的氣候模式預報資料;由於此龐大 的模式預報資料並不易由外界取得,因此氣象局在模式研發方面,實有必要投入 更多的資源及人力,以加強氣象局全球預報模式及氣候預報系統之發展與改進, 使預報作業單位能獲得更優質的預報資料及預報指引。

季節內至季節(S2S)尺度的氣候預報關鍵為模式模擬 Madden-Julian 振盪 (MJO)的預報能力,為增進氣象局全球模式及氣候預報系統之發展與改進,職 本次出國研習,主要任務為參訪夏威夷大學國際太平洋研究中心(International Pacific Research Center, IPRC),並與該中心李天明教授與王斌教授之研究團隊進 行技術交流與合作研發。利用氣象局全球模式,針對 MJO 個案,進行月、季時 間尺度的個案模擬,以評估氣象局全球模式對於季節內至季節(S2S)尺度的氣 候預報能力,此外並針對 MJO 肇始及傳播物理過程進行模擬與診斷,以期更深 入了解 MJO 系統之肇始及傳播的物理及動力機制,對於模式預報技術的提升與 模式改進方向,奠定更佳的知識基礎與技術能力。

由 MJO 工作組/GASS(Jiang et al., 2015)所籌畫的 MJO 預報評估計畫, 全球共有 27 個國家的最先進氣候模式參與其中。其報告指出,在這些模式中, 只有四分之一模式能夠模擬出 MJO 的向東傳播。由氣象局的全球模式所進行的

19

多個案模擬結果發現,氣象局全球預報模式,當進行2周以內的模擬預報,不 管採用 Tiedtke scheme 或 NSAS scheme 均能夠模擬出 MJO 的向東傳播;在超出 2周以外的模擬預報,如進行1個月及3個月時間尺度的月及季模擬預報,全 球模式採用 Tiedtke scheme 有較佳結果。對於 MJO 的向東傳播,以 DYNAMO 實 驗期間的個案進行模擬,其對於發生於2011年10月中旬至12月中旬的兩個 MJO 事件都能連續模擬出向東的傳播。

利用氣柱垂直積分濕靜能(MSE)的能量收支方程診斷,發現 Tiedtke scheme 較能掌握與 MSE 時間變化率相關的垂直及水平 MSE 平流、輻射及可感熱變異 量之東西不對稱性,即掌握控制對流發展的垂直速度和水平運動的非絕熱加熱 結構的緯向分佈(Wang et al., 2017)。對於 MJO 的肇始,一個可能的過程是在 先前抑制階段之海溫距平對於隨後發展 MJO 對流之延遲效應(Li et al., 2008)。 由全球模式偶合一維 SIT 海洋模式的模擬結果亦發現,海溫的正變異量對於隨 後發展 MJO 的對流有很好的相關。此外,在 MJO 肇始前,低層的水氣、東風 及垂直速度的正變異量均增加,此與 Li et al. (2015)之 DYNAMO 實驗期間的 MJO 個案診斷結果相近。同時,與 MSE 時間變化率相關的垂直及水平 MSE 平 流、晴空的短波輻射、潛熱與可感熱變異量亦有正貢獻。

Tiedtke scheme 對於垂直速度有模擬過強的現象,過強的垂直上升速度可 能造成 MJO 深對流系統提前生成及持續時間短,對於淺對流系統則可能有過度 發展;此外,過強的下降速度可能造成對流抑制區之過度乾燥,而影響後續 MJO 的發展。

NSAS scheme 最大的缺點是對流模擬偏弱,隨著積分時間的增加,此情形 越明顯,其對流的高度很難達 500hPa 以上,常侷限在 850hPa 以下,故很難發 展出如 MJO 般的深對流系統,因此 MJO 的模擬不佳。

夏威夷大學國際太平洋研究中心(The International Pacific Research Center, IPRC)為一國際性的氣候研究中心,該中心之李天明教授與王斌教授均為國際上氣候研究領域非常知名的學者,尤其王斌教授更於2015年獲得美國

氣象學會所頒發象徵氣象界最高榮譽的"The Carl-Gustaf Rossby Research Medal" 獎項,職非常感謝也很榮幸能有此研習機會,可與此兩位氣象界優秀的前輩一同 工作與學習,此研習經驗將有助於增進氣象局研發人員的專業知識及技術能力, 更重要的是拓展氣象局人員的國際視野及與國際交流合作的機會。此一交流機會 將有助於加強作業單位與國際研究單位的持續合作及政府對外的國際接軌。建議 氣象局應持續支持此類研習機會並維持與夏威夷大學國際太平洋研究中心李天 明教授與王斌教授之合作關係。

- Businger, J. A., J. C. Wyngaard, Y. Izumi, and E. F. Bradley, 1971: Flux-profile relationships in the atmospheric surface layer, *J. Atmos. Sci*, **28**, 181-1894-701.
- Clough, S.A., M.W. Shephard, E.J. Mlawer, J.S. Delamere, M.J. Iacono, K. Cady-Pereira, S. Boukabara, and P.D. Brown, 2005: Atmospheric radiative transfer modeling: A summary of the AER codes. J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer., 91, 233-244.
- Dee, D.P. and co-authors, 2011: The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system, *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 137, 553-597, doi: 10.1002/qj.828.
- Ek, M., K. E. Mitchell, Y. Lin, E. Rogers, P. Grunmann, V. Koren, G. Gayno, and J. D. Tarpley, 2003: Implementation of Noah land surface model advances in the National Centers for Environmental Prediction operational mesocale Eta Model. *J. Geophys. Res.*, **108**, 8851, doi:10.1029/2002JD003296.
- Han, J., and H.-L. Pan, 2011: Revision of convection and vertical diffuseion schemes in thr NCEP Global Forecast System. Wea. Forecasting, 26, 520-533.
- Iacono, M. J., J. S. Delamere, E. J. Mlawer, M.W. Shephard, S.A. Clough, and W.D. Collins, 2008: Radiative forcing by long-lived greenhouse gases: Calculations with the AER radiative transfer models. J. Geophys. Res., 113, D13103, doi:10.1029/2008JD009944.
- Jiang, et al., 2015: Vertical structure and physical processes of the MJO: Exploring key model physics in climate simulations. *JGR-Atmosphere*, **120**, 4718-4748.
- Li, J.-L., 1994: On shallow cumulus parameterization scheme for large-scale planetary boundary layers. Ph.D. thesis, University of Wisconsin-Madison, pp203.
- Li, T., F. Tam, X. Fu, T. Zhou, and W. Zhu, 2008: Causes of the intraseasonal SST

variability in the tropical Indian Ocean, *Atmosphere-Ocean Science Letters*, **1**, 18-23.

- Li, T., C. Zhao, P.-C. Hsu, and T. Nasuno, 2015: MJO Initiation processes over the tropical Indian Ocean during DYNAMO/CINDY2011. J. Climate, 28, 2121-2135.
- Neelin, J. D., and I. M. Held, 1987: Modeling tropical convergence based on the moist static energy budget, *Mon. Weather Rev.*, **115**, 3–12.
- Palmer, T. N., G. Shutts, and R. Swinbank, 1986: Alleviation of a systematic westerly bias in general circulation and numerical weather prediction models through an orographic gravity wave drag parameterization. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **112**, 1001-1039.
- Pan, and W.-S. Wu, 1995: Implementing a mass flux convective parameterization package for the NMC medium-range forecast model. NMC Office Note 409, 40pp.
- Tiedtke, M., 1989: A Comprehensive mass flux scheme for cumulus parameterization in large-scale models. *Monthly Weather Review*, **117**, 1779-1800.
- Troen, I., and L. Mahrt, 1986: A simple model of the atmospheric boundary layer: Sensivity to surface evaporation. *Bound. Layer Meteor.*, **37**, 129-148.
- Tsuang B-J, Tu C-Y, Arpe K, 2001: Lake parameterization for climate models. *Max-Planck-Institute for Meteorology Rept.*, **316**, p 72.
- Tsuang et al., 2009: A more accurate scheme for calculating earth's skin temperature. *Climate Dynamics*, **32**, 251-272.
- Tu C-Y, Tsuang B-J, 2005: Cool-skin simulation by a one-column ocean model. Geophys Res Lett, 32: L22602. doi:10.1029/2005 GL024252.
- Wang, L., T. Li, E. Maloney, and B. Wang, 2017: Fundamental causes of propagating and non-propagating MJOs in MJOTF/GASS models. *J. Climate*, **30**, 3743-3769.

Zhao and F. H. Carr, 1997: A prognostic cloud scheme for operational NWP models. *Mon. Wea. Rev.*, , 1931–1953.

附圖(表):

表1、CWBGFS T511 模式物理參數化方法

| Radiation | RRTMG (Clough et al., 2005, Iacono et al., 2008) | | |
|---------------------------|---|--|--|
| Cumulus | Simplified Arakawa-Schubert (Pan and Wu, 1995, Han | | |
| | and Pan, 2011) | | |
| | Tiedtke scheme(Tiedtke, 1989) | | |
| Large Scale Precipitation | Predict could water scheme (Zhao and Frederick, 1997) | | |
| Shallow Convection | Li and Young (1993) | | |
| PBL | First-order nonlocal scheme (Troen and Mahrt, 1986) | | |
| Surface Flux | Similarity theory (Businger, 1971) | | |
| Land Model | Noah land surface model(Ek et al.,2003) | | |
| Gravity Wave Drag | Palmer et al. (1986) | | |

表 2、SIT 模組各垂直層之深度

| 層 | 深度 | 層 | 深度 | 層 | 深度 |
|----|--------|----|-------|----|-------|
| | (m) | | (m) | | (m) |
| 0 | 0 | 11 | 10 | 22 | 110.2 |
| 1 | 0.0005 | 12 | 13.7 | 23 | 120.4 |
| 2 | 1 | 13 | 22.9 | 24 | 130.7 |
| 3 | 2 | 14 | 32.3 | 25 | 141.1 |
| 4 | 3 | 15 | 41.7 | 26 | 151.6 |
| 5 | 4 | 16 | 51.2 | 27 | 162.1 |
| 6 | 5 | 17 | 60.8 | 28 | 172.8 |
| 7 | 6 | 18 | 70.5 | 29 | 183.6 |
| 8 | 7 | 19 | 80.3 | 30 | 194.5 |
| 9 | 8 | 20 | 90.1 | | |
| 10 | 9 | 21 | 100.2 | | |



圖 1. (a) ERA 重分析資料與 2011 年 10 月(b) 5、(c) 10、(d) 15 日不同初始 場所模擬南北緯 5 度平均之 OLR 變異量時序圖。







圖 3. 濾波後之降水及 OLR (等值線)變異量於(a) ERA 重分析、(b) Tiedtke scheme 模擬 (c) NSAS scheme 模擬南北緯 5 度平均之變異量時序圖。



圖 4. 濾波後南北緯 5 度平均之濕靜能變異量(等值線為水氣比濕變異量值) (a) 剖面圖、(b) 東經 60-70 度平均之時序圖。



圖 5. 南北緯 5 度平均之未濾波 OLR (a) ERA 重分析、(b) Tiedtke scheme 模擬 (c) NSAS scheme 模擬時序圖;南北緯 5 度平均之濾波後 OLR (d) ERA 重分 析、(e) Tiedtke scheme 模擬 (f) NSAS scheme 模擬變異量(anomaly)時序 圖。



圖 6. 濾波後水氣比濕(Q)、東西向風速(U),於東經 60-70 度,南北緯 5 度間之
區域平均值的時序圖(等值線為水氣比濕變異量值)。(a)、(b) ERA 重分析,
(c)、(d) Tiedtke scheme 模擬, (e)、(f) NSAS scheme 模擬。





圖 7. ERA 重分析資料 850hPa 於(a) 2011/10/15、(b) 2011/11/15 前後 15 日平均 水氣場。



圖 8. 濾波後南北向風速(V)、垂直向風速(Omega)變異量,於東經 60-70 度,南 北緯 5 度間之區域平均值的時序圖(等值線為水氣比濕變異量值)。(a)、(b) ERA 重分析, (c)、(d) Tiedtke scheme 模擬, (e)、(f) NSAS scheme 模擬。



圖 9. 濾波後雲水及雲冰混和比(Qc)、溫度變異量,於東經 60-70 度,南北緯 5
 度間之區域平均值的時序圖(等值線為水氣比濕變異量值)。(a)、(b) ERA
 重分析, (c)、(d) Tiedtke scheme 模擬, (e)、(f) NSAS scheme 模擬。



圖 10. 濾波後濕靜能(MSE)變異量(等值線為水氣比濕變異量值)及濕靜能隨時間 的區域隨時間變化率(等值線為濕靜能變異量值),於東經 60-70 度,南北 緯 5 度間之區域平均值的時序圖。(a)、(b) ERA 重分析, (c)、(d) Tiedtke scheme 模擬, (e)、(f) NSAS scheme 模擬。



圖 11. 濾波後濕靜能東西向平流、濕靜能南北向平流變異量 (等值線為濕靜能變 異量值),於東經 60-70 度,南北緯 5 度間之區域平均值的時序圖。(a)、 (b) ERA 重分析, (c)、(d) Tiedtke scheme 模擬, (e)、(f) NSAS scheme 模擬



圖 12. 濾波後濕靜能垂直方向平流、輻射及潛熱及可感熱變異量(等值線為濕靜 能變異量值),於東經 60-70 度,南北緯 5 度間之區域平均值的時序圖。 (a)、(b) ERA 重分析, (c)、(d) Tiedtke scheme 模擬, (e)、(f) NSAS scheme 模擬



圖 13. 2011/10/05~2011/11/01 期間,濾波後水氣比濕,於南北緯 5 度間之區域平 均值的緯向剖面圖。(a)~(f) ERA 重分析, (g)~(l) Tiedtke scheme 模擬, (m)~(r) NSAS scheme 模擬。



圖 14. 2011/11/05~2011/12/01 期間,濾波後水氣比濕,於南北緯 5 度間之區域平 均值的緯向剖面圖。(a)~(f) ERA 重分析, (g)~(l) Tiedtke scheme 模擬, (m)~(r) NSAS scheme 模擬。



圖 15. 由地表垂直積分到 100hPa,南北緯 5 度區域平均的濕靜能之區域隨時間 變化率、濕靜能東西向水平平流、南北向水平平流及垂直平流變異量 (anomaly)之緯向時序圖(等值線為濕靜能變異量值)。(a)~(d) ERA 重分析, (e)~(h) Tiedtke scheme 模擬, (i)~(l) NSAS scheme 模擬。



圖 16. 南北緯 5 度區域平均的地面溫度(海面為海溫)、潛熱(LH)及可感熱(SH)變
 異量之緯向時序圖(等值線為 OLR 變異量值)∘(a)~(c) ERA 重分析, (d)~(f)
 Tiedtke scheme 模擬, (g)~(i) NSAS scheme 模擬。



圖 17. 由地表垂直積分到 100hPa,南北緯5度區域平均的晴空長短波輻射貢獻(等 值線為濕靜能變異量值)及晴空長波輻射貢獻、雲的短波輻射貢獻及長波 輻射貢獻變異量(等值線為 OLR 變異量值)之緯向時序圖。(a)~(d) ERA 重 分析, (e)~(h) Tiedtke scheme 模擬, (i)~(l) NSAS scheme 模擬。