

積雲參數化方法對MJO肇始和傳播的影響

張美玉¹
中央氣象局氣象科技中心¹

林沛練² 周明達²
國立中央大學²

李天明³
美國夏威夷大學³

摘要

利用中央氣象局全球預報模式(CWBGFS)偶合 SIT 海洋模式模擬及 ERA-interim 重分析資料診斷，探討不同積雲參數化方法 TDK 法(Tiedtke,1989)和 SAS 法(Simplified Arakawa-Schubert; Pan and Wu, 1995; Han and Pan, 2011) 對 MJO 肇始和傳播模擬之影響。

分析與模擬結果顯示，海溫正距平領先 OLR 負距平，顯示海溫距平與 MJO 對流的發展存有高度的相關性。分析 MJO 肇始區之海溫距平影響機制發現，入射地表(海面)的總加熱通量距平為影響海溫距平變化的主要機制；其中短波輻射和潛熱通量分別為 TDK 法和 SAS 法模擬組影響海溫變化的最主要機制。此外，低層大氣 1000-700hPa 氣柱積分之輻散距平與地表的總加熱通量距平亦呈現正相關性，顯示低層大氣的輻散(輻合)效應與 MJO 對流相關並受積雲參數化方法之影響。TDK 法的模擬顯示，邊界層會產生較強勁的大尺度輻合，此輻合效應可驅動較強的濕靜能水平及垂直平流通量，導致雲輻射效應及積雲潛熱效應增強，有利於後續 MJO 肇始發生。

利用濕靜能收支方程診斷 ERA 分析資料顯示，在 MJO 抑制期，大氣濕靜能水平平流貢獻為最初加熱機制，其後伴隨邊界層輻合增強的濕靜能垂直平流加熱貢獻，與隨對流雲發展增強的中高層雲輻射加熱貢獻，使 MJO 系統產生向西向上傾斜的濕靜能距平結構；TDK 法模擬組有類似 ERA 分析之結果，但因其對流模擬持續時間偏短，造成濕靜能距平偏弱。SAS 法模擬組則因對流模擬強度偏弱，雲輻射效應亦隨之偏弱；對流雲模偏少的模擬，使地表潛熱通量為平衡入射地表短波輻射有偏強的模擬；受濕靜能之垂直平流加熱和地表潛熱加熱貢獻之影響，對流系統呈現向西向下傾斜的濕靜能距平結構。MJO 系統的濕靜能距平垂直結構，將直接影響系統位能場距平和緯向風場距平，使濕靜能的水平平流距平和局部變化率距平亦隨之變化，進而影響 MJO 的傳播方向。

一、前言

季內振盪 (Madden-Julian Oscillation, 以下簡稱 MJO) 為一發生於熱帶赤道區之季節內尺度的大氣擾動，最初由 Roland Madden 與 Paul Julian 兩位學者分析 1957~1967 年 10 年的熱帶太平洋區域緯向風及氣壓場變異量 (anomaly) 所發現 (Madden and Julian 1971, 1972)。由 Madden and Julian (1972) 的研究指出，MJO 的主要表現特徵為一向東移動的大尺度熱帶深對流系統及相伴的兩個緯向環流胞；此大尺度環流和深對流的偶合系統在向東移動過程中，有明顯的降水變異 (anomaly) 發生。由後續衛星外逸長波輻射 (Outgoing Longwave Radiation, 以下簡稱 OLR) 的觀測分析 (Murakami and Nakazawa 1985) 指出，MJO 具有緩慢東移的行星尺度大氣波動特徵，其波速約 5m/s，週期為 30~60 天。由於 MJO 為季節內尺度的天氣現象，並與不同尺度的氣候與天氣系統，如聖嬰現象、季風、颱風及中緯度天氣系統間，存有相互反饋之作用，因此 MJO 被視為影響熱帶大氣季節內變化最重要機制之一 (Zhang 2005)。

數值預報模式被視為目前預測未來天氣和氣候的最重要的工具之一，但準確的模擬與預測 MJO，以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，仍是科學上一項嚴峻的挑戰。由多模式的模擬評估指出，積雲參數化方法的選擇，

對於 MJO 東傳的模擬，扮演重要的角色 (Slingo et al. 1996; Lin et al. 2006; Hung et al. 2013)，因此不同積雲參數化方法所產生對 MJO 系統能量收支差異之影響，將是我們探討的重點。為進一步了解 MJO 的肇始、發展及傳播的機制，本研究將以 ERA-interim 重分析資料和中央氣象局全球預報模式 (CWBGFS) 偶合 SIT (Snow/Ice/Thermocline) 海洋模式之模擬結果，進行 MJO 肇始和傳播的動力及熱力機制及不同積雲參數化方法對 MJO 肇始和傳播之影響之探討。

二、資料、模式和方法

本研究將針對 DYNAMO (Dynamics of the Madden-Julian Oscillation) 實驗期間之 MJO-1 (10 月中旬至 11 月中旬) 及 MJO-2 (11 月中旬至 12 月中旬) 個案，利用 ERA-interim 重分析資料 (Dee et al., 2011) 進行診斷分析 (以下簡稱 ERA 分析)，並透過數值模式進行此期間的模擬評估。

本研究採用的中央氣象局全球模式為一大氣波譜模式，水平解析度約 25 公里，垂直方向有 60 分層，模式採用的物理參數化方法如表 1；SIT 模式為一結合雪、冰及水體 (Snow/Ice/Thermocline) 三相的一維海洋模式，此模式可處理海水、冰及雪之能量交換，並透過溫度能量傳輸模組，進行海洋表層溫度的預報 (Tsuang et al. 2001; Tu and Tsuang 2005; Tsuang et al. 2009)。海溫預報主要範圍為赤道至南北緯 30 度以內，

水平網格與大氣模式相同，SIT 海洋模式垂直方向共 30 分層，總深度約 200 公尺。為探討在數值模式中對 MJO 預報產生最重要影響的積雲對流過程，本研究將選擇 Tiedtke 積雲參數化方法 (Tiedtke, 1989；以下簡稱 TDK 法) 和 SAS 積雲參數化方法 (Simplified Arakawa-Schubert；Pan and Wu 1995, Han and Pan 2011；以下簡稱 SAS 法)，進行個案模擬(積分 107 天)之預報評估。

Radiation	RRTMG scheme (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 cloud water scheme (Zhao and Frederick 1997)
Shallow Convection	Han and Pan (2011)
PBL	First-order nonlocal scheme (Troen and Mahrt 1986; Hong and Pan 1996; Han and Pan 2011)
Surface Flux	Similarity theory (Businger 1971)
Land Model	Noah model (Ek et al. 2003)
Gravity Wave Drag	Palmer et al. (1986)

表 1、CWBGFS 模式物理參數化方法

本研究對於所有大氣變量(X)將分解為大氣變量之低頻背景(LFBS)分量、MJO 分量和高頻(HF)分量等 3 個分量；其中以大氣變量的 30 日滾動平均為大氣變量的低頻背景分量；以大氣變量與 5 日滾動平均之差值為高頻分量；5 日滾動平均減去 30 日滾動平均之差值為 MJO 分量，即

$$X = \bar{X} + X' + X^* \quad (1)$$

(1)式中 \bar{X} 為大氣變量之低頻背景分量， X' 為 MJO 分量， X^* 為高頻分量。以此濾波方式所計算的 MJO 分量視為 MJO 距平(anomaly)。

大氣的濕靜能(MSE, Moist Static Energy)為大氣的乾靜能(DSE, Dry Static Energy, $DSE=C_pT+gz$)和水氣潛熱能量之總和，如式(2)

$$MSE = DSE + L_vQ = C_pT + gz + L_vQ \quad (2)$$

其中 C_p 為定壓下比熱(=1004 JK⁻¹kg⁻¹)、T 為溫度、 L_v 為凝結潛熱(=2.5x10⁶ Jkg⁻¹)、q 為比濕、g 為重力加速度(=9.8 ms⁻²)、z 為高度。

利用氣柱垂直積分之濕靜能預報方程式(Neelin and Held 1987; Yannai et al. 1993)，探討 MJO 肇始和傳播的物理機制。

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

$$+SH + LH \quad (3)$$

其中 $\langle \rangle$ 表由地表至 100hPa 之氣柱垂直積分；方程式(3)等號左邊項為氣柱垂直積分的濕靜能定點時間變化率，等號右邊第一項為氣柱垂直積分的濕靜能東西向水平平流貢獻，第二項為氣柱垂直積分的濕靜能南北向水平平流貢獻，第三項為氣柱垂直積分的濕靜能垂直平流貢獻；氣柱垂直積分的濕靜能非絕熱加熱項，包括氣柱垂直積分的輻射通量 $\langle Q_R \rangle$ 、地表可感熱通量(SH) 和地表潛熱通量貢獻(LH)。為探討不同變數及機制之間的相關性，則透過相關係數(correlation coefficient)來進行後續分析。

三、分析和模擬

由東經50-180度間，南北緯5度區域平均，海溫與 OLR距平的時序變化(圖1)可見，在2011年10至11月期間，海溫正距平領先OLR負距平，因此，海溫的升溫與MJO對流間存有高度的相關性。在東經50-70度區域間，有顯著的海溫高溫區(>29.5°C)，對流(OLR負距平)和海溫正距平於此區以東，呈現向東傳播現象；故本研究採用此區為MJO肇始區。在此MJO肇始區，海溫變化率距平和地表總加熱通量距平有良好的正相關(圖2)，說明地表總加熱通量距平可視為影響海溫距平變化的重要機制。

利用地表總加熱通量與海溫變化率求算出地表各加熱通量對海溫變化率距平之貢獻可見，在MJO肇始區，海溫變化率主要受地表短波輻射和潛熱通量距平貢獻之影響。TDK法和SAS法所模擬的地表短波輻射加熱通量距平均小於ERA分析，顯示模式所模擬的地表短波輻射距平效應皆有不足；TDK法模擬的輻射加熱距平較接近分析值，SAS法模擬的輻射加熱距平則小於TDK方法模擬結果和ERA分析。反之，SAS法模擬的地表潛熱加熱較大，顯示其大氣濕靜能非絕熱加熱能量來源，主要亦來自地表潛熱加熱的貢獻。

為進一步探討影響MJO肇始的動力和熱力機制及評估使用不同積雲參數化方法對MJO動力和熱力機制的影響，並避免模式因積分時間增加所造成系統偏差增大的影響，本研究選擇DYNAMO實驗MJO-1個案(2011/10/1-2011/10/31)結果，進行個案診斷評估。

由ERA分析可見(圖3)，在MJO抑制前期，東風距平由較暖濕的東方，帶來的水平平流的正距平通量，為MJO抑制前期在肇始區中最早的加熱機制。在MJO抑制後期，肇始區出現南風距平並產生低層暖濕空氣的輻合。此外，大氣低層之輻散距平與地表總加熱通量距平有良好正相關，但相位稍超前(圖4)；顯示低層大氣的輻散(輻合)效應與MJO對流相關並受積雲參數化方法之影響。TDK法的模擬顯示，邊界層會產生較強勁的大尺度輻合，此輻合效應可驅動較強的濕靜能水平及垂直平流通量，導致雲輻射效應及積雲發展增

強，有利於後續MJO肇始發生；因此，積雲參數化方法對於MJO肇始的模擬扮演著關鍵的角色。

進一步檢視濕靜能之垂直平流加熱貢獻顯示，絕熱上升運動產生的降溫效應，將使濕靜能垂直平流加熱在700 hPa 以上產生負距平貢獻。故當低層輻合產生後，大氣的垂直平流效應會造成低層的加熱及高層的冷卻效應；若將濕靜能垂直平流加熱貢獻進行氣柱之垂直積分，則呈現與MJO系統發展相應的負距平貢獻(圖5)。

檢視ERA分析與使用TDK法和SAS法模擬組結果，三者間最大差異為濕靜能的非絕熱加熱項(圖5)。由ERA分析可見(圖6)，在MJO肇始前，大氣的非絕熱加熱項和水氣潛熱加熱項在500hPa以下低層有正距平貢獻，但大氣非絕熱加熱項略去水氣潛熱加熱效應，大氣濕靜能的非絕熱貢獻項為負距平，顯示水氣潛熱的加熱效應在500hPa以下有最大貢獻，即水氣釋出的潛熱貢獻為對流增強的主要機制；當對流發展至500hPa以上高度，濕靜能的非絕熱加熱項有正距平，即在500hPa以上中高層大氣，雲輻射加熱有顯著正貢獻；因此，雲的輻射加熱對MJO的肇始及深對流的維持有同相加成的貢獻。

TDK法模擬組在對流發展初期，低層的水氣潛熱加熱相當強勁，但中高層的潛熱加熱偏弱，以致MJO肇始發生延遲；雲輻射加熱效應亦偏弱，使MJO發展偏弱且持續時間偏短。SAS法模擬組因對流模擬甚微弱，地表通量和水氣潛熱主要加熱於大氣700hPa以下低層，最強的非絕熱加熱發生於MJO肇始時，之後非絕熱加熱衰減，對流很難發展至500hPa以上，主要的濕靜能非絕熱加熱能量來自地表潛熱通量貢獻且相位落後於主對流系統，此濕靜能非絕熱能量機制，將影響MJO系統發展及傳播方向。

為了解 MJO 傳播的動力和熱力機制，採用於 DYNAMO 期間 107 天(2011/10/1-2012/01/16)分析及模擬資料，對東經 70 度至 90 度，南緯 5 度至北緯 5 度區域之各組資料的逐日降水距平進行迴歸分析，由濕靜能預報方程式之各貢獻項與降水距平的迴歸分析(圖 7)可見，氣柱濕靜能水平平流貢獻項相位領先 MJO 降水距平相位，顯示此能量貢獻在 MJO 抑制期及發展期加熱主對流系統；此外，氣柱濕靜能的垂直平流相位和降水距平相位為反相位；反之，濕靜能的非絕熱貢獻項與降水距平相位有很好的正相關性，顯示濕靜能的非絕熱加熱貢獻為影響 MJO 傳播的重要機制。

由 ERA 分析組和各模擬組之濕靜能距平與各組逐日降水距平進行迴歸分析，檢視 MJO 濕靜能之迴歸分析結果(圖 9)可見，ERA 分析組對降水距平迴歸之對流系統濕靜能距平呈現向西向上傾斜的結構，即在降水系統中心以東低層和降水系統中心以西高層有較大濕靜能正距平；TDK 法模擬組亦有類似結構，但

強度偏弱；SAS 法模擬組之迴歸分析則顯示，降水系統之濕靜能分布呈現接近垂直的結構，此外，在降水系統中心以西低層有濕靜能正距平，此與低層潛熱通量加熱相關，使迴歸的對流系統濕靜能呈現向西向下傾斜的結構，此熱力結構將不利於對流的增強和向東移動。

進一步探究影響 MJO 傳播的機制，利用時間延遲相位為零(time lag=0)之濕靜能各貢獻項迴歸分析，評估各項之影響可見(圖 11)，濕靜能的垂直平流貢獻與非絕熱加熱貢獻有良好反相關特性，顯示濕靜能垂直平流效應可有效抵銷大部分濕靜能非絕熱的加熱效應；則濕靜能的水平平流對濕靜能局部變化率有較大貢獻，由分析亦可見，二者有較高的相關性。此外，濕靜能的局部變化率(local tendency)之正距平反應 MJO 傳播方向，因此濕靜能水平平流的影響機制對於 MJO 傳播方向有重要的影響。

探討影響濕靜能水平平流距平之機制發現，大氣濕靜能距平之熱力垂直結構會影響對流系統位能距平梯度分布，進而影響水平風場距平及 MJO 傳播，由 ERA 分析之位能場迴歸分析結果顯示，在對流系統低(高)層有緯向的位能梯度負(正)距平，有利於產生西(東)風距平；此高低層的風切效應，有助於 MJO 系統東移；TDK 法模擬組有類似結構，但強度偏弱；SAS 法模擬組之緯向位能梯度，則有利於東風距平和系統向西移動。進一步探討影響濕靜能的機制，濕靜能非絕熱加熱貢獻距平與濕靜能距平有較高的相關(圖 8)，顯示濕靜能的非絕熱加熱貢獻亦為影響 MJO 熱力結構及傳播的重要機制。

四、結論

由分析與模擬結果顯示，海溫的正距平領先 OLR 的負距平，顯示海溫的正距平與 MJO 對流的發展存有高度的相關性。探討海溫對 MJO 的肇始影響發現，地表的加熱通量為影響海溫變化的重要機制；其中短波輻射和潛熱通量分別為 TDK 法和 SAS 法模擬組影響海溫變化的最主要機制。此外，低層大氣 1000-700hPa 氣柱積分之輻散距平與地表的總加熱通量距平亦呈現正相關性，顯示低層大氣的輻散(輻合)效應與 MJO 對流相關並受積雲參數化方法之影響。TDK 法的模擬顯示，邊界層會產生較強勁的大尺度輻合，此輻合效應可驅動較強的濕靜能水平及垂直平流通量，導致雲輻射效應及積雲發展增強，有利於後續 MJO 肇始發生；因此，積雲參數化方法對於 MJO 肇始的模擬扮演著關鍵的角色。

檢視 ERA 分析，在 MJO 抑制期，大氣濕靜能水平平流貢獻為最初的加熱機制，其後伴隨邊界層輻合增強的濕靜能垂直平流的加熱貢獻，與隨對流雲發展增強的中高層雲輻射加熱貢獻，使 MJO 系統呈現向西向上傾斜的濕靜能距平結構；TDK 法模擬組的結果有

類似 ERA 分析之濕靜能距平結構，但因對流發展持續時間偏短，以致其濕靜能距平偏弱；SAS 法模擬組則因對流模擬偏弱，雲輻射效應亦偏弱；雲量模擬偏少，使地表潛熱通量為平衡入射地表短波輻射有偏強的模擬；受濕靜能之垂直平流加熱和地表潛熱加熱貢獻之影響，對流系統呈現向西向下傾斜的濕靜能距平結構。此傾斜的熱力結構將影響後續 MJO 系統的傳播。

由濕靜能預報方程式之各貢獻項與降水距平的迴歸分析顯示，濕靜能的非絕熱加熱貢獻與濕靜能有較高的相關性，顯示濕靜能的非絕熱加熱貢獻為影響濕靜能熱力結構的重要機制。此外，由於濕靜能的垂直平流貢獻與非絕熱加熱有良好反相關特性，垂直平流效應有效抵銷大部分大氣非絕熱的加熱效應，使濕靜能的水平平流貢獻與濕靜能的局部變率(local tendency)有較高的相關性，而濕靜能的局部變率則反應 MJO 傳播方向。探究影響緯向風場及濕靜能水平平流，以致影響 MJO 傳播的關鍵，在於 MJO 加熱過程所形成的濕靜能垂直熱力結構所驅動的風場及後續的垂直及水平平流效應與非絕熱加熱通量的反饋。在本研究，濕靜能的非絕熱加熱貢獻與濕靜能有較高的相關，顯示濕靜能的非絕熱加熱貢獻為影響 MJO 熱力結構的重要機制。此外，濕靜能的水平平流對濕靜能局部變化率有較高的相關性。而濕靜能的局部變化率(local tendency)之正距平反應 MJO 傳播方向，因此濕靜能水平平流的影響機制對於 MJO 傳播方向亦有重要的影響。積雲參數化方法因直接控制對流系統的發展，並影響與對流系統相關的加熱過程及產生對流系統之熱力結構，最後趨動 MJO 傳播，故為模擬 MJO 傳播的重要關鍵機制。

參考文獻

- 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**, 181-189-701.
- 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 Coauthors, 2011: The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system, *Q. J. Roy. Meteorol. Soc.*, **137**, 553-597.
- 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 mesoscale Eta Model. *J. Geophys. Res.*, **108**, 8851, doi:10.1029/2002JD003296
- Han, J. and Pan, H. L. , 2011: Revision of Convection and Vertical Diffusion Schemes in the NCEP Global Forecast System. *Weather Forecast*, **26**, 520-533.
- Hung, M.-P., J.-L. Lin, W. Wang, D. Kim, T. Shinoda and S.J. Weaver, 2013:MJO and convectively coupled equatorial waves simulated by CMIP5 climate models. *J. Climate*, **26**, 6185-6214.
- Lin, J.-L., and Coauthors, 2006: Tropical intraseasonal variability in 14 IPCC AR4 climate models. Part I: Convective signals. *J. Climate*, **19**, 2665-2690.
- Madden R. and P. Julian, 1971: Detection of a 40-50 day oscillation in the zonal wind in the tropical Pacific, *J. Atmos. Sci.*, **28**, 702-708.
- Madden R. and P. Julian, 1972: Description of global-scale circulation cells in the tropics with a 40-50 day period. *J. Atmos. Sci.*, **29**, 1109-1123.
- Murakami, T., and T. Nakazawa, 1985: Tropical 45 day oscillations during the 1979 Northern Hemisphere summer. *J. Atmos. Sci.*, **42**, 1107-1122
- Neelin, J. D., and I. M. Held, 1987: Modeling tropical convergence based on the moist static energy budget, *Mon. Weather Rev.*, **115**, 3-12.
- Tiedtke, M., 1989: A Comprehensive Mass Flux Scheme for Cumulus Parameterization in Large-Scale Models. *Monthly Weather Review*, **117**, 1779-1800.
- Tsuang B- J, Tu C-Y, Arpe K, 2001: Lake parameterization for climate models. *Max-Planck-Institute for Meteorology Rept.*, **316**, p72
- 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
- Yanai, M. and Johnson, R. H., 1993: Impacts of cumulus convection on thermodynamic fields. *Meteorological Monographs*, K.A. Emanuel and D. J. Raymond, Amer. Meteor. Soc., 39-41.
- Zhang, C. 2005: Madden-Julian Oscillation. *Reviews of Geophysics*, **43**, 1-36.
- Zhao and F. H. Carr, 1997: A prognostic cloud scheme for operational NWP models. *Mon. Wea. Rev.*, **125**, 1931-1953.

附圖

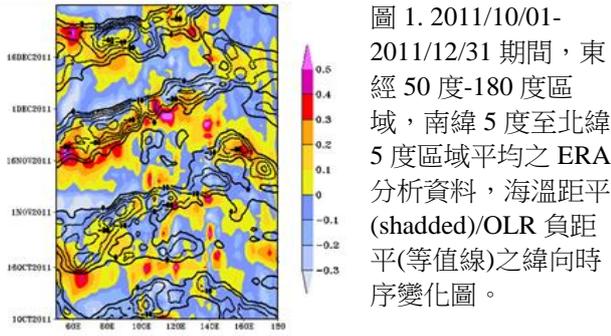


圖 1. 2011/10/01-2011/12/31 期間，東經 50 度-180 度區域，南緯 5 度至北緯 5 度區域平均之 ERA 分析資料，海溫距平 (shaded)/OLR 負距平(等值線)之緯向時序變化圖。

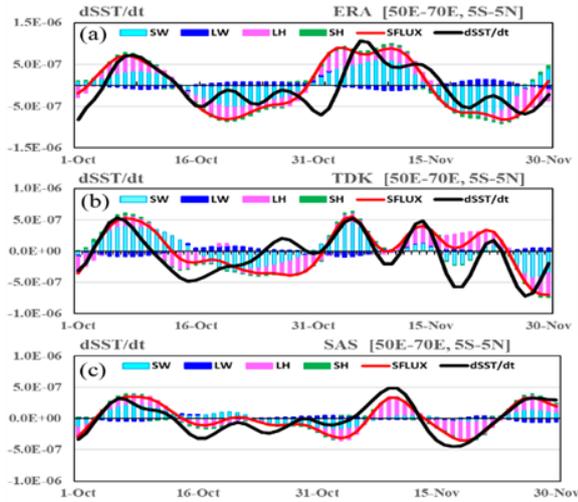


圖 2. 2011/10/01-2011/11/30 期間，(a)ERA 分析，(b)TDK 法及(c)SAS 法模擬組之海溫變化率與地表加熱各通量之海溫變化率貢獻時序圖。

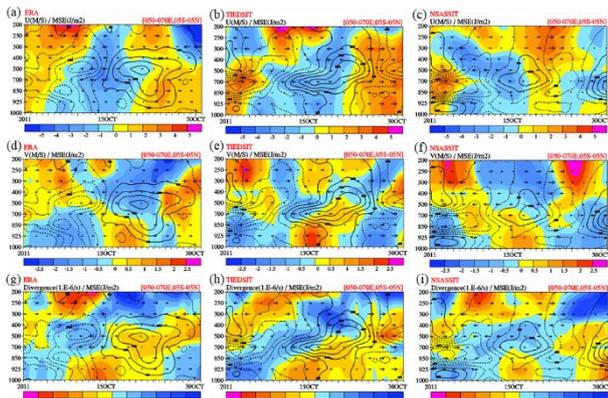


圖 3. 2011/10/01-2011/10/31 期間，濕靜能距平(等值線)、東西向風距平(風矢)及 (a)-(c) U(m/s)、(d)-(f) V(m/s)、(g)-(i) Divergence(1.E-6/s)距平(color shading)之垂直變化時序圖。其中(a)，(d)，(g)使用ERA分析資料；(b)，(e)，(h)使用TDK法模擬組結果；(c)，(f)，(i) 使用SAS 法模擬組結果。

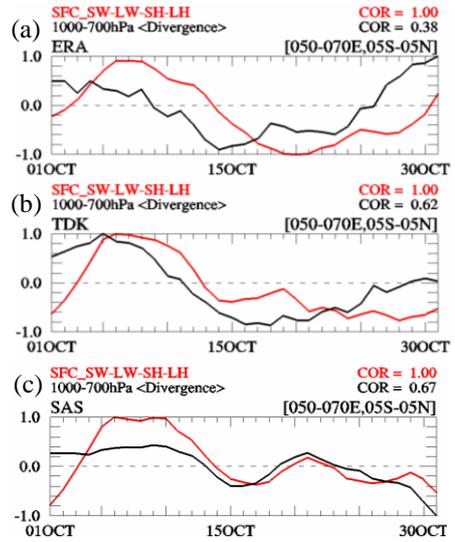


圖 4. 2011/10/01-2011/10/31 期間，地表總加熱量和 1000-700hPa 垂直積分輻散量之時序圖。(a)ERA 分析；(b) TDK 法；(c) SAS 法模擬組結果。

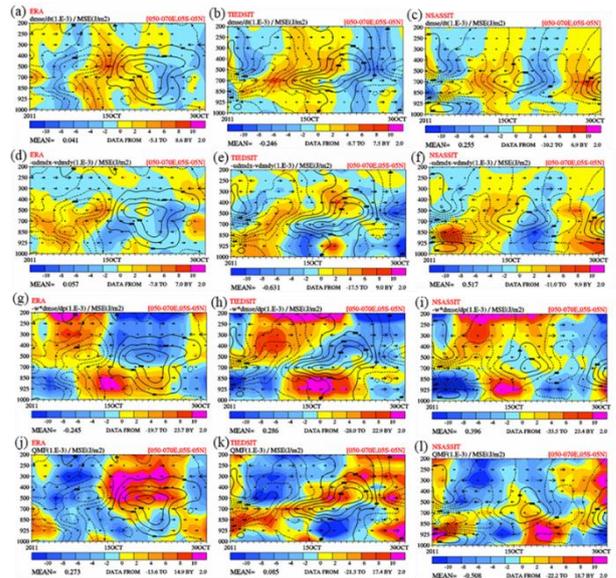


圖 5. 211/10/01-2011/10/31 期間，濕靜能距平(等值線)、東西向風距平(風矢)及(a)-(c)濕靜能局部變率距平($\partial MSE/\partial t$)、(d)-(f) 濕靜能水平平流距平($-u \partial MSE/\partial x - v \partial MSE/\partial y$)、(g)-(i)濕靜能垂直平流距平($-\omega \partial MSE/\partial p$) 及 (j)-(l)濕靜能非絕熱加熱距平(QMF)垂直變化時序圖。其中(a)，(d)，(g)，(j)使用 ERA 分析資料；(b)，(e)，(h)，(k)使用 TDK 法模擬組結果；(c)，(f)，(i)，(l) 使用 SAS 法模擬組結果。

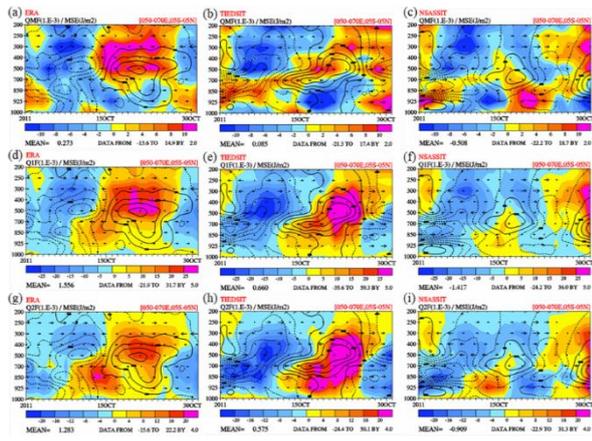


圖 6. 2011/10/01-2011/10/31 期間，濕靜能距平(等值線)、東西向風距平(風矢)及 (a)-(c)濕靜能非絕熱加熱貢獻項(QMF=Q1F-Q2F)、(d)-(f)大氣非絕熱加熱貢獻項(Q1F)、(h)-(i)水氣潛熱加熱貢獻項(Q2F)距平(color shading)垂直變化時序圖。其中(a)，(d)，(g)使用 ERA 分析資料；(b)，(e)，(h)使用 TDK 法模擬組結果；(c)，(f)，(i) 使用 SAS 法模擬組結果。

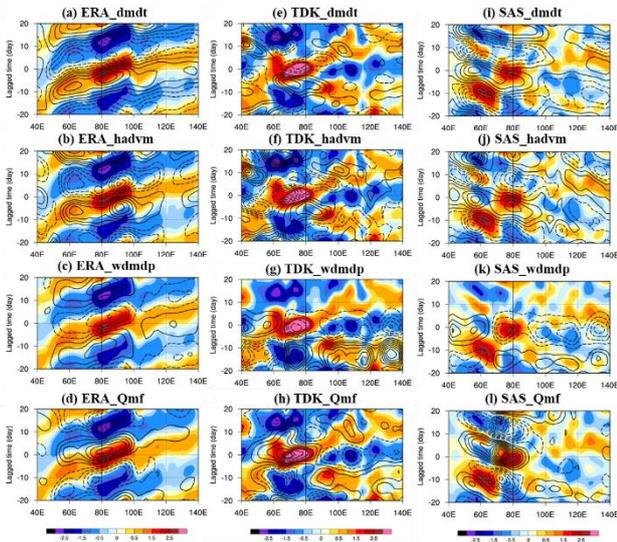


圖 7. 與 DYNAMO 期間 107 天 (2011/10/1-2012/01/16)，東經 70 度至 90 度，南緯 5 度至北緯 5 度區域之逐日降水距平進行迴歸分析之濕靜能局部變率距平(dmdt)、濕靜能水平平流距平(hadvm)、濕靜能垂直平流距平(wdmdp)及濕靜能非絕熱加熱貢獻距平(qmf)分布。其中(a)-(d)，使用 ERA 分析資料；(e)-(h)，使用 TDK 法模擬組結果；(i)-(l)，使用 SAS 法模擬組結果。

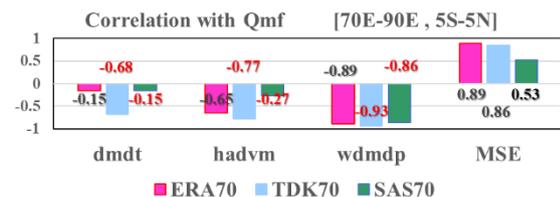


圖 8. 迴歸分析之濕靜能非絕熱加熱貢獻距平(qmf)與濕靜能局部變率距平(dmdt)、濕靜能水平平流距平

(hadmv)、濕靜能垂直平流距平(wdmdp)和濕靜能之相關。

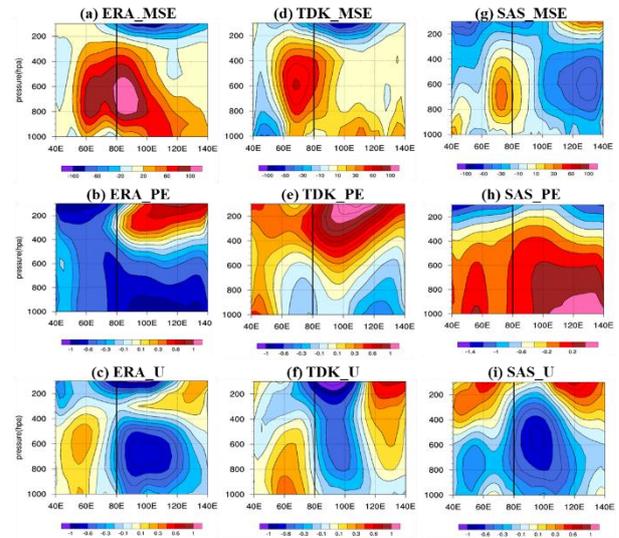


圖 9. 與降水距平進行迴歸分析之濕靜能、位能及緯向風距平之垂直分布。其中(a)-(c)，使用 ERA 分析資料；(d)-(f)，使用 TDK 法模擬組結果；(g)-(i)，使用 SAS 法模擬組結果。

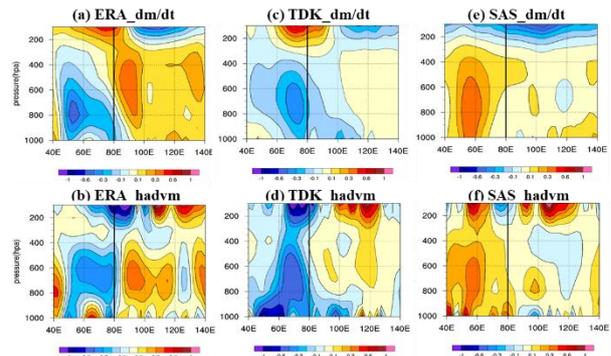


圖 10. 與降水距平進行迴歸分析之濕靜能局部變率距平及濕靜能水平平流距平之垂直分布。其中(a)-(b)，使用 ERA 分析資料；(c)-(d)，使用 TDK 法模擬組結果；(e)-(f)，使用 SAS 法模擬組結果。

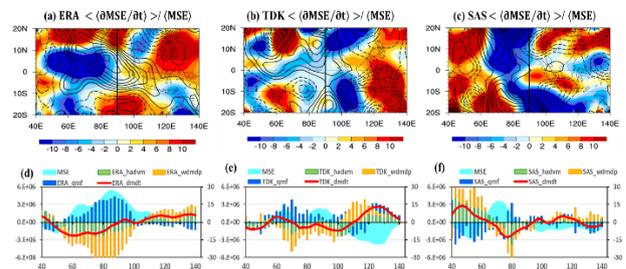


圖 11. 與降水距平進行迴歸分析，時間延遲相位為零 (time lag=0)之(a)-(c)濕靜能(等值線)及濕靜能局部變率(shading)分布、(d)-(f)濕靜能及濕靜能貢獻項迴歸分析結果，其中(a)、(d)，使用 ERA 分析資料；(b)、(e)，使用 TDK 法模擬組結果；(c)、(f)，使用 SAS 法模擬組結果。