

氣象局全球預報模式(CWB GFS)與一維海洋模式(SIT) DYNAMO實驗案例研究

郭珮萱¹ 陳建河¹ 莊秉潔² 林昌鴻¹

中央氣象局資訊中心¹ 國立中興大學環境工程學系²

摘要

利用中央氣象局全球預報模式GFS (Global Forecast System)模式與可處理雪、冰及水體的一維海洋模式SIT (Snow/Ice/Thermocline, SIT)整合，針對2011年DYNAMO(Dynamics of the Madden-Julian Oscillation)期間進行GFS模式有、無SIT模式之案例測試，敏感度測試結果，積雲參數對DYNAMO實驗雨帶移動速率有明顯影響，使用New SAS積雲機制對2011年11月DYNAMO預報度有限，雨帶東移速率慢，而使用Tiedtke之積雲機制後明顯可預報出2011年11月之DYNAMO案例，且提高模式所預報之MJO強度較接近觀測。由OLR(outgoing longwave radiation)及雨量結果顯示，使用Tiedtke之積雲機制後明顯可預報出2011年11月之降雨帶東移的現象，且加入SIT模組後，可進一步增加OLR及降雨帶東移的速度，使東移速度與觀測接近、提高DYNAMO現象的預報力。此外，目前SIT模組在海洋大陸溫度暖偏差，未來可能針對SIT模組進行相關參數或模擬範圍調整，以降低SIT模組之海溫模擬偏差。

關鍵字：GFS、SIT、DYNAMO

一、前言

結合水體、冰及雪(Snow/Ice/Thermocline)三相之模式(簡稱SIT)為一維海洋模式，可處理海上海、冰及雪之能量交換，針對海洋表面溫度變化發展溫度能量傳輸模組，可計算海水表面之溫度，其在熱帶海洋表層的模擬結果已刊出在Geophysical Research Letter (Tu and Tsuang, 2005)，並已成功的在用德國MPI (Max Planck Institute for Meteorology)機構所發展之ECHAM4/5氣候模式中測試完成(Tsuang et al., 2001, 2009)，此一參數化方法可以模擬出海表面之Cool Skin，並減少海氣Couple過程10 W/m²之能量誤差。2015年Tseng等人利用ECHAM5與SIT整合之ECHAM5-SIT進行25年模擬，研究結果發現其對國際間已知之赤道季節振盪Madden-Julian Oscillation (MJO)之模擬有顯著之改進(Tseng et al., 2015)。此外，Jiang等人(2015)也整理許多模式針對MJO之模擬結果，顯示ECHAM5-SIT對MJO之模擬結果在27個模式中亦佔前20%強(Jiang et al., 2015)。

配合中央氣象局GFS模式之發展，因此引進SIT一維海洋模式，期望可利用SIT模組海氣交換的模擬技術，嘗試改善GFS模式的下邊界模擬之技術。本文利用案例進行模擬測試，嘗試了解SIT模組加入GFS模式後，並探討對模式模擬結果的影響。

二、研究方法

GFS與SIT之偶合模式(簡稱GFS-SIT)，主要由大氣模式提供大氣下邊界之能量通量、風場等資訊傳入SIT，SIT經過計算海洋各層水溫後，最後將計算後的表水水溫傳回大氣模式進行大氣部分計算。由於海面結冰或下雪過程之計算過程較複雜，因此目前先針對海水部分進行計算，於40°S-40°N間海洋網格啟動SIT模組計算，GFS與SIT之間偶合方式示意如圖1所示。

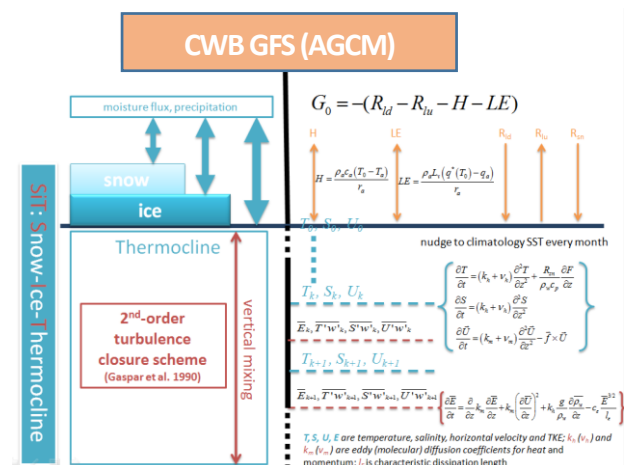


圖1，CWB GFS模式與SIT模組偶合示意圖

圖中，G0為海表面的能量通量，Rld及Rlu為向上及向下的輻射通量，H為可感熱通量，LE為潛熱通量，這些主要由GFS模式提供模式下邊界資料給SIT。海面下T表示溫度，S表示鹽度，U表示洋流，W表示水體。Ta為大氣溫度，T0為水表面溫度，Tk表示第k-1層至第k層的平均水溫。

目前模擬GFS模式大氣解析度為T319 (經度960格，緯度480格) L60(高度60層，模式頂層0.1 mb)，SIT模組將海洋深度0-200公尺間分為31層，其中0-10公尺表層海水分為11層，各層海水之間主要使用TKE (Turbulent Kinetic Energy)能量守恆方式(Gasper et al., 1990)垂直計算各層海水之間的能量變化，經由有限差分法計算至模式設定最底層，即可獲得各層的溫度，詳細SIT模式說明可參考(Tsuang et al., 2001; Tu and Tsuang 2005; Tsuang et al., 2009)。SIT模組應用範圍可視案例而定，為避免海溫在邊界處有明顯不連續性，採用權重方式計算SIT海溫與GFS模式海溫，以獲得邊界處±10°間之新海溫，如SIT模組應用於±30° N，則在南北緯30° -40°間進行權重計算。

而由於SIT模組在過去研究中可改善ECHAM模式對MJO的模擬，2011年10月至2012年3月間，許多國家研究單位在印度洋共同進行大型觀測實驗，以了解MJO生成機制，稱為DYNAMO (Dynamics of the Madden-Julian Oscillation)，因此，為了解GFS加入SIT模組是否也有較好的DYNAMO模擬結果，案例研究中也針對2011年10-12月DYNAMO實驗期間進行案例探討。同時，為了解不同積雲、淺對流及邊界層等機制對模擬結果的影響，先選用不同組合進行模式敏感度測試，並使用較好參數組合進行2011年11月45天模擬研究。

三、結果與討論

3.1、敏感度分析

以2011年10-12月進行積雲、淺對流及邊界層機制之敏感度測試，表1為模擬使用的參數設定，其中初始場為每月1、15日並進行16天的模擬，積雲機制代碼3為New SAS (simplified Arakawa-Schubert (SAS) convection scheme, Han and Pan, 2011)機制，是GFS模式目前作業版本使用的機制，由於降雨帶的產生亦與積雲參數化機制有關，因此增加代碼4-Tiedtke積雲參數化機制(Tiedtke, 1993 & Nordeng 1994)，此機制亦應用於ECHAM5模式中(Roeckner et al., 2003)。淺對流機制代碼1為Tiedtke機制(Tiedtke et al., 1988)為GFS模式舊版淺對流機制，代碼2為New SAS淺對流機制(Han and Pan, 2011)，是GFS作業版本主要使用機制。邊界層機制代碼2為GFS模式舊版邊界層機

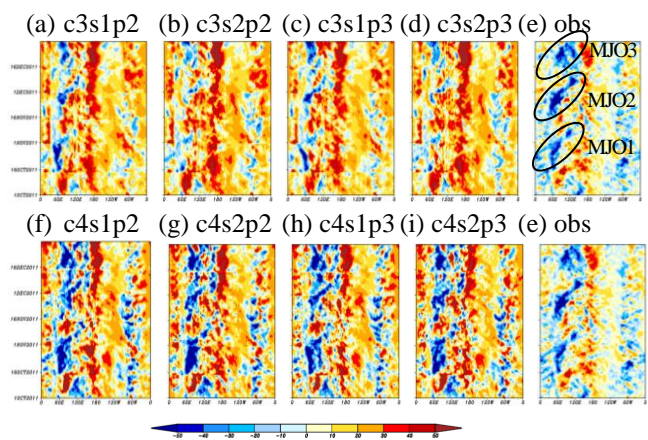
制(Hong and Pan, 1996)，代碼3為New SAS邊界層機制(Han and Pan, 2011)。測試結果顯示，積雲機制對MJO的模擬敏感度較大，淺對流及邊界層機制敏感度較小，因此下述討論以積雲機制為主要分類。

表1，GFS模式及GFS-SIT模式模擬設定值

機制	案例名稱				案例名稱			
	c3s1p3	c3s2p3	c3s1p2	c3s2p2	c4s1p3	c4s2p3	c4s1p2	c4s2p2
積雲	3	3	3	3	4	4	4	4
淺對流	1	2	1	2	1	2	1	2
邊界層	3	3	2	2	3	3	2	2

初始日期(00Z)：(2011年) 10/1、10/15、11/1、11/15、12/1、12/15
 海溫、海冰比例、雪厚度：不更新
 SIT模組nudging設定：(1) 0-10 m: 不nudging；(2) 10-100 m: 1 day；(3) 100m以下: 1 day

(1) GFS



(2) GFS-SIT

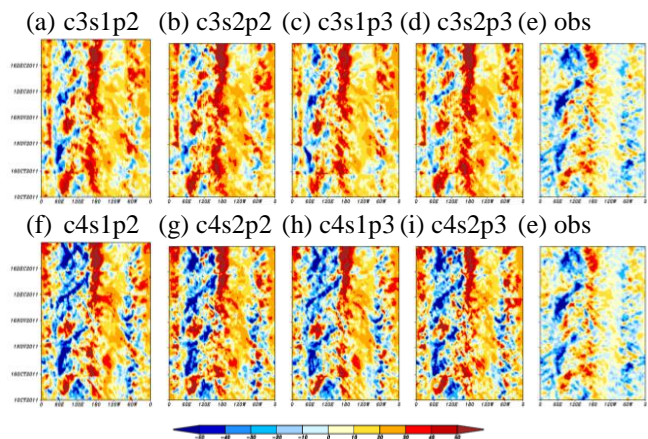


圖2，GFS、GFS-SIT模式各案例及觀測(obs) OLR與觀測氣候值距平

圖2為GFS及GFS-SIT模式整合2011年10-12月每月1、15日預報之OLR與觀測氣候值距平，為±5° N緯向平均資料，X軸為經度0-360度，Y軸由下而上時間為2011年10月1日至12月31日，圖(1)為GFS模式之結果，(2)為GFS-SIT模式之結果，(a)-(d)及(f)-(i)為各案例的結果，(e)為觀測值。觀測資料為NOAA網站所

提供資料，為NCAR之日均OLR觀測資料（來源：http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.interp_OLR.html），資料格式為 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ 。在MJO事件中，由於雲的產生使得OLR下降，而兩帶由西向東移動的情況下，也可同時觀察到低OLR由西向東的移動，因此圖中觀測值(圖(e))有三個明顯低OLR隨時間由西向東發展的區間即為MJO事件，圖中兩模式之結果可發現，使用New SAS積雲機制(案例c3，圖(a)-(d))，兩模式模擬之MJO強度偏弱、低OLR由西向東移動現象不明顯，GFS模式僅在「c3s1」的案例中略可模擬出MJO2事件，GFS-SIT模式雖略可模擬出低OLR由西向東移動的現象，但強度偏弱東移量不足。使用Tiedtke積雲機制(案例c4，圖(f)-(i))，兩模式皆可模擬出低OLR隨時間由西向東移動的現象，且MJO強度與觀測較接近，針對模擬較好的MJO2事件，GFS模式模擬之低OLR較分散、移動較不連續，而GFS-SIT模式之結果則與觀測較相似，模擬之低OLR較集中、向東移動較連續。

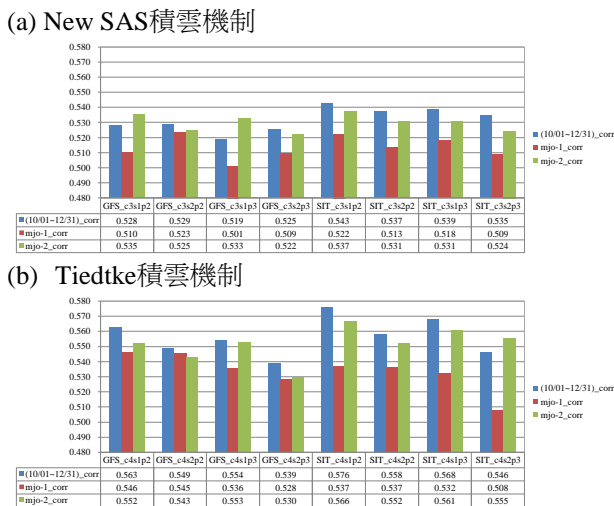


圖3，GFS、GFS-SIT模式各案例模擬OLR與觀測OLR之相關係數

圖3為GFS及GFS-SIT模式於MJO1、MJO2事件及10-12月各案例之OLR與觀測OLR之相關係數結果，統計範圍與圖2相同，為 $\pm 5^{\circ}N$ 緯向平均資料，圖(a)為使用New SAS積雲機制各案例結果，圖(b)為使用Tiedtke機制各案例結果。由圖中可知使用Tiedtke積雲機制下模擬OLR相關係數明顯提高，平均而言相同機制組合下，使用GFS-SIT模式之OLR相關係數較GFS模式高。

此外，利用OLR及200 hPa、850 hPa壓力場水平風速u之結果進行EOF (Empirical Orthogonal Functions)分析，圖4為模擬MJO2期間之ROMI phase結果(MJO1圖略)，圖(a)為以NSAS機制為主之結果，圖(b)為以Tiedtke機制為主之結果，圖中黑色線為NCEP資料之結果，彩色線為GFS或GFS-SIT與不同

淺對流及邊界層組合之結果。圖中明顯可看出，以Tiedtke積雲機制(圖(b))為主的模擬之MJO強度較NSAS高，且明顯較NSAS之結果接近觀測值。

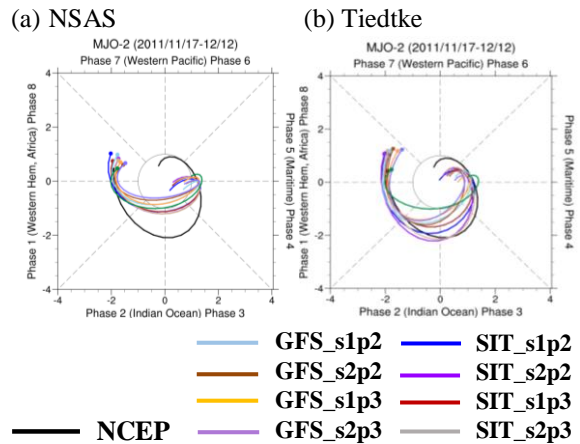


圖4，MJO2期間各案例模擬之ROMI (Real-time OLR MJO Index) Phase

由圖2至圖4結果顯示，依據OLR及MJO強度的模擬結果，選用機制組合「c4s1p2」為最適機制，即「Tiedtke (1993) & Nordeng (1994)積雲機制+ Tiedtke (1988)淺對流機制+ Hong and Pan (1996)邊界層機制」，並以此機制組合進行後續GFS及GFS-SIT模式之DYNAMO期間45天回溯預報模擬實驗。

3.2、45天回溯預報模擬實驗

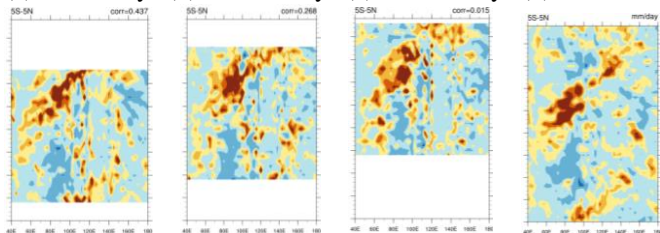
依據敏感度分析的結果，選用「c4s1p2」的機制組合針對2011年11月進行45天回溯預報模擬實驗，因SIT與GFS主要交換海表溫度，為了解不同海表溫度對模式DYNAMO模擬的影響，因此同時選用不同海溫設定以了解海溫對DYNAMO模擬的影響，GFS及GFS-SIT模式之案例設定如表2所示。

表2，模式模擬案例設定

案例名稱	GFS_pSST	GFS_dSST	SIT_511IWP
初始時間	2011年11月1-30日，每日00Z		
海表溫度	固定	每00Z更新	每00Z更新 (當觀測參考值)
海溫、海冰比例、雪厚度	模式	每00Z更新	每00Z更新
SIT 設定	無SIT	無SIT	範圍設定： 25°S-25°N 20°E-190°E (含Blending 10°) Nudging 設定： (5d, 1d, 1d)

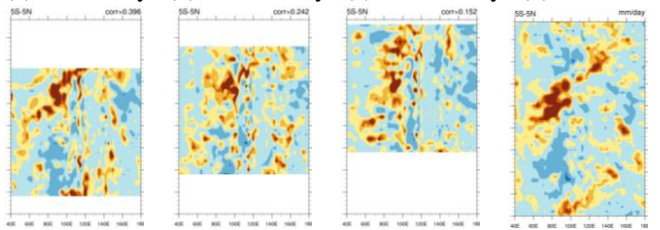
(1) GFS_pSST

(a) lead 5 days (b) lead 10 days (c) lead 15 days (d) GPCP



(2) GFS_dSST

(a) lead 5 days (b) lead 10 days (c) lead 15 days (d) GPCP



(3) SIT_511IWP

(a) lead 5 days (b) lead 10 days (c) lead 15 days (d) GPCP

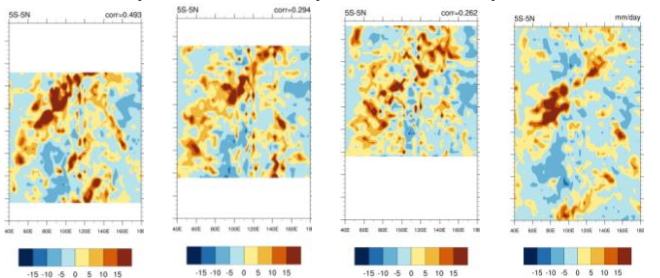


圖5，5°S-5°N間各案例第5、10、15日模擬降雨量、觀測(GPCP)降雨量與氣候值距平圖

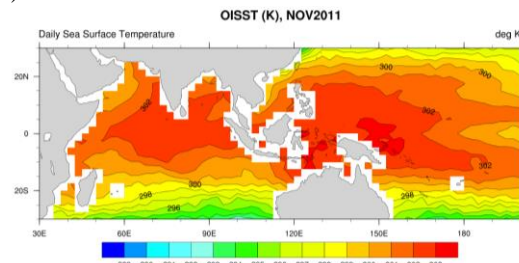
圖5為整合11/1-30每日回溯預報之第5、10、15日雨量與氣候值之距平，觀測資料為Global Precipitation Climatology Project (GPCP) 日均雨量(資料來源：<http://precip.gsfc.nasa.gov/>)，資料格式為2.5°x2.5°。圖(1)為GFS_pSST案例之結果，圖(2)為GFS_dSST案例之結果，圖(3)為SIT_511IWP案例之結果。圖(a)-(c)為模式模擬第5、10、15日整合之距平，圖(d)為GPCP資料，其中藍色表示雨量減少，紅色表示雨量增加。在預報第5日時，兩模式模擬的降雨發生時間及雨帶東移速度皆與觀測值相近，但在預報第10、15日時，GFS模式所模擬的降雨有延遲5-10天的情況，且雨帶東移速率較慢，而GFS-SIT模式之降雨時間則與觀測相近，且仍保有與觀測相近的東移速度。

表3，各案例5°S-5°N間預報第5、10、15日之降雨量距平圖與觀測距平圖之趨勢相關係數表

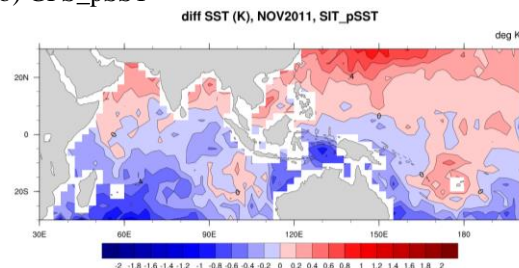
案例名稱	GFS_pSST	GFS_dSST	SIT_511IWP
第5天	0.44	0.40	0.49
第10天	0.27	0.24	0.29
第15天	0.02	0.15	0.26

將圖5各案例之(a)-(c)圖與觀測(d)圖進行相關趨勢分析後，可得表3之結果，其中在第5、10天的整合結果兩模式跟觀測值的相關係數相近，而在第15天的整合結果中，以SIT_511IWP之相關係數0.26為三案例中最高，顯示使用SIT模組考量海氣交換之機制對模式雨帶的模擬仍有幫助。

(a) OISST



(b) GFS_pSST



(c) SIT_511IWP

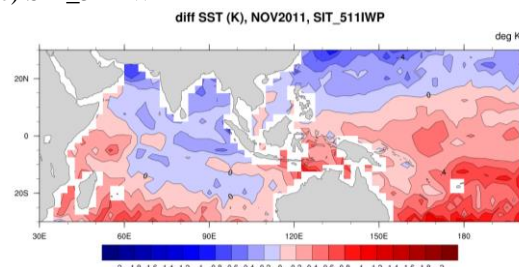


圖6，2011年11月OISST平均SST及模擬案例SST距平

由上述的結果顯示，GFS-SIT模式對DYNAMO雨帶發展的時間及東傳的距離模擬較好後，仍需進一步確認GFS-SIT對海溫模擬之偏差量。圖6為2011年11月模擬案例月均SST與觀測OI SST (Optimum Interpolation Sea Surface Temperature)之月均SST與氣候值之距平，圖(a)為月均OI SST (資料來源：<https://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.noaa.oisst.v2.highres.html>)，圖(b)為GFS_pSST案例之11月平均海溫距平圖，圖(c)為SIT-511IWP案例之11月模擬海溫距平圖。在11月模擬過程中，GFS模式若使用固定海溫，則在海洋大陸附近有海溫偏低的現象(圖(b))，而SIT模組所模擬的海溫在海洋大陸附近有偏高的現象(圖(c))。海洋大陸海溫模擬暖偏差可能是因赤道附近由於陽光較強，對海水的加熱量大，而模組以較高溫的觀測表水海溫nudging至100 m深的海溫，造成海水溫度過高。

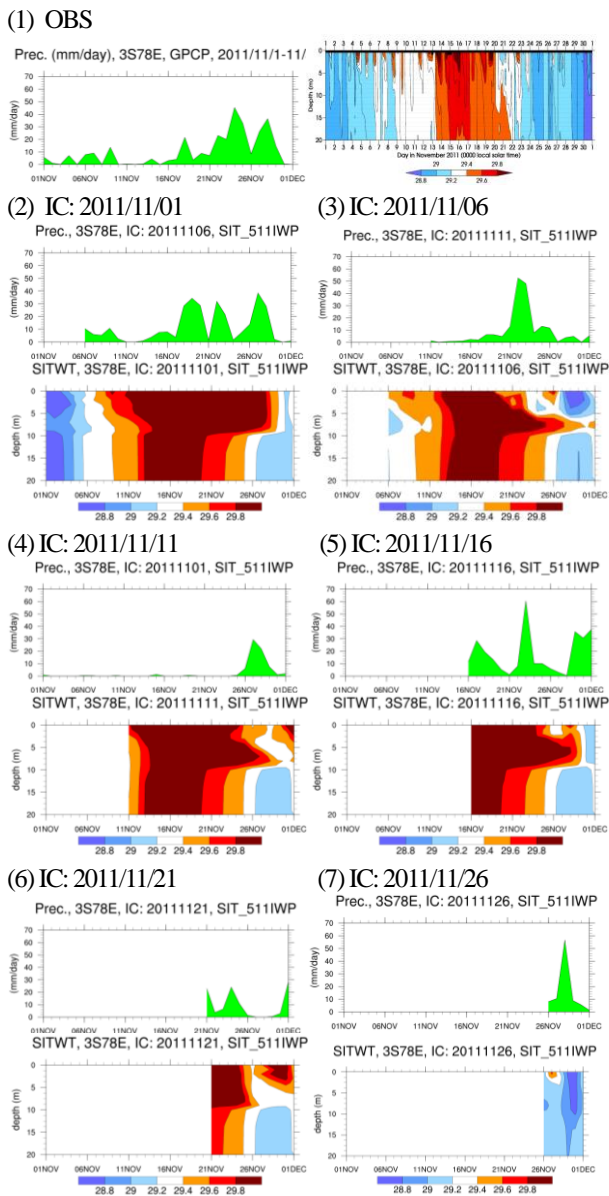


圖7，觀測及SIT_511IWP案例之降雨量、(3S, 78E)格點海溫時間序列圖

圖7為觀測及SIT_511IWP案例之降雨量(左圖或上圖，綠色陰影部分)及(3S, 78E)格點海溫(右圖或下圖，藍色至紅色陰影部分)時間序列圖，圖(1)為觀測值，圖(2)-(7)為不同初始時間模擬(3S, 78E)格點之降雨量及海溫。觀測雨量為GPCP雨量，海溫剖面為Matthews et al. (2014)在鄰近(3S, 78E)海洋上所量測之剖面，圖(2) 11/1及圖(3) 11/6初始海水較冷的情況下，可模擬出如觀測海溫增加的現象，但因20°E-190°E以外範圍的海溫以分析場海溫為主海溫較正確，海氣交互作用下，在後期模式開始降雨較持續，大氣傳入海洋能量較少，因此海溫下降速度較快。圖(5) 11/16及圖(6) 11/21也可看出下雨後上層海溫下降量增多。圖(7) 11/26初始海溫已低的情況下，因已開始下雨，海溫持續下降。

(1) GFS_pSST vs. GFS_dSST (2) GFS_pSST vs. SIT_511IWP

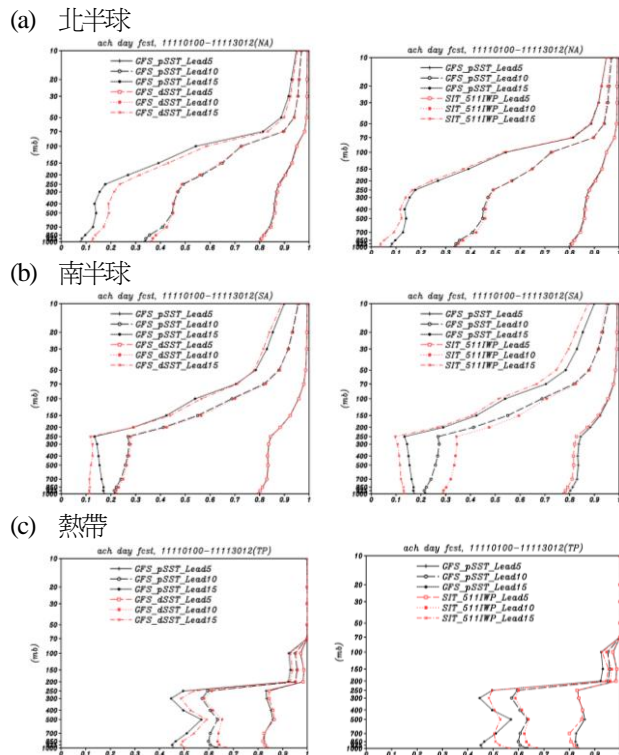


圖8，各案例於2011/11/1-30模擬第5、10、15日之高度場距平相關係數比較圖

同時，為了解各案例對大氣高度場之距平相關係數之結果，圖8為GFS_pSST案例與其他案例於2011/11/1-30間模擬第5、10、15日高度場距平相關係數之比較，左圖為GFS_pSST(黑線)與GFS_dSST(紅線)之比較，右圖為GFS_pSST(黑線)與SIT_511IWP(紅線)之比較，圖(a)為北半球地區(20N-80N)之結果，圖(b)為南半球地區(80S-20S)之結果，圖(c)為熱帶地區(20S-20N)之統計結果。「GFS_dSST」在北半球及熱帶地區在第10天及第15天之距平相關係數較GFS_pSST高，SIT_511IWP之結果在熱帶地區第5日之相關係數較GFS_dSST差，在第10日之結果較GFS_pSST好，第15日則是下層較好500 hPa附近較差。GFS-SIT在前5日大氣高度場距平相關係數變差可能是GFS-SIT本身有系統性偏差，使得前幾日模擬結果不如GFS_pSST案例好。

由此可知，GFS-SIT模式雖對DYNAMO兩帶發展的時間及東傳的距離模擬較好，但針對海溫的模擬仍有需要調整的地方，如對海洋大陸之海溫模擬暖偏差，及模擬前5日大氣高度場之距平相關係數變低等。因此，未來仍需進一步進行SIT模組海溫模擬及海溫剖面分布調整工作，如：進行長時間模擬瞭解SIT模組系統性誤差、修改0-10 m海溫與觀測值的 nudging 方式、及調整SIT模組與GFS模式資料交換時間等。

四、結論與建議

利用中央氣象局GFS模式與一維海洋模式SIT整合之GFS_SIT模式進行DYNAMO期間案例研究結果顯示，不同機制組合的敏感度分析結果可依積雲機制分為兩類：(1)使用New SAS積雲機制：對2011年11月MJO預報度有限，在MJO開始後雖可預報出低OLR有隨時間東移的現象，但東移速度較慢，所預報之MJO強度偏弱。(2)使用Tiedtke之積雲機制：可明顯預報出2011年11月之MJO案例，雨帶東移速度與觀測相近，同時，此機制提高模式所預報之MJO強度，使預報MJO強度較接近觀測。由OLR距平之相關係數以及MJO各階段強度變化的結果顯示，「c4s1p2」(Tiedtke (1989) & Nordeng (1994)積雲機制+ Li and Wang (2000)淺對流機制+ Hong and Pan (1996)邊界層機制)之機制組合對MJO之模擬結果最適組合。

敏感度分析後，選擇「c4s1p2」之機制組合進行2011年11月1-30日每日1次45天之回溯預報實驗，且依不同的SST更新方式、有無使用SIT模式進行實驗，結果顯示：(1)第5日：預報之降雨發生時間及雨帶東移速度皆與觀測值相近；(2)第10、15日：GFS模式有雨帶東移速率較慢的趨勢，GFS-SIT模式則降雨時間則與觀測相近，並保有與觀測相近的東移速度。

但SIT模組在目前在海洋大陸有暖偏差的情況，主要是因赤道附近由於陽光較強，對海水的加熱量大，而模組以較高溫的觀測表水海溫nudging 10 m深的海溫，可能造成10 m深海水溫度過高，使得下層暖海水溫度向上傳遞，且未考慮海水水平流項將海水能量傳遞至其他區域，因此，陽光加熱海水的能量保留在海水中，使得海溫增加量較大，使得海溫較高。因此，未來可利用更多案例研究，調整SIT模組相關參數、測試不同大小的SIT模組應用範圍，或調整SIT模組與GFS模式資料交換時間，以找尋SIT模組於GFS模式之最佳的應用範圍及模擬方式。

五、參考文獻

1. Gaspar, P., Grégoris, Y., Lefevre, J. M., 1990: "A simple eddy-kinetic-energy model for simulations of the ocean vertical mixing: Tests at station Papa and Long-Term Upper Ocean Study Site", *J. Geophys. Res.*, 95, 16179-16193.
2. Han, J., and H.-L. Pan., 2011: "Revision of convection and vertical diffusion schemes in the

NCEP global forecast system", *Weather and Forecasting*, 26, 520-533.

3. Hong, S.-Y., and H.-L. Pan., 1996: "Nonlocal boundary layer vertical diffusion in a medium-range forecast model", *Monthly Weather Review*, 124, 2322-2339.
4. Jiang, X., Waliser, D. E., Xavier, P. K., Petch, J., Klingaman, N. P., Woolnough, S. J., ... & Hannay, C., 2015: "Vertical structure and physical processes of the Madden-Julian oscillation: Exploring key model physics in climate simulations", *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 120(10), 4718-4748.
5. Matthews, A. J., Baranowski, D. B., Heywood, K. J., Flatau, P. J., & Schmidtko, S., 2014: "The surface diurnal warm layer in the Indian Ocean during CINDY/DYNAMO", *Journal of Climate*, 27(24), 9101-9122.
6. Nordeng, T. E., 1994: "Extended versions of the convective parameterization scheme at ECMWF and their impact on the mean and transient activity of the model in the tropics", Technical Memorandum 206, ECMWF, Reading, UK.
7. Roeckner, E., Bäuml, G., Bonaventura, L., Brokopf, R., Esch, M., Giorgetta, M., ... & Rhodin, A., 2003: "The atmospheric general circulation model ECHAM 5. PART I: Model description"
8. Tiedtke, M., 1993: "Representation of clouds in large-scale models", *Monthly Weather Review*, 121(11), 3040-3061.
9. Tiedtke, M., W. A. Heckley, and J. Slingo., 1988: "Tropical forecasting at ECMWF: The influence of physical parameterization on the mean structure of forecasts and analyses", *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 114, 639-644.
10. Tseng, W. L., Tsuang, B. J., Keenlyside, N. S., Hsu, H. H., & Tu, C. Y., 2015: "Resolving the upper-ocean warm layer improves the simulation of the Madden-Julian Oscillation", *Climate Dynamics*, 44(5-6), 1487-1503.
11. Tsuang, B.-J., Tu, C.-Y., & Arpe, K., 2001: "Lake Parameterization for climate models. Max-Planck-Institute for Meteorology", Report No. 316, Hamburg.
12. Tsuang, B.-J., Tu, C.-Y., Tsai, J. L., Dracup, J. A., Arpe, K., & Meyers, T., 2009: "A more accurate scheme for calculating Earth's skin temperature", *Climate dynamics*, 32(2-3), 251-272.
13. Tu, C. Y., & Tsuang, B. J., 2005: "Cool-skin simulation by a one-column ocean model", *Geophysical research letters*, 32(22).