

全球海氣偶合數值預報模式對中長期天氣預報結果的改善 -以馬登-朱利安震盪為例

邵允銓¹

曾于恒¹
海洋研究所¹
國立臺灣大學

陳建河²
資訊中心²
中央氣象局

郭怡君¹

摘 要

過去研究發現若全球大氣數值模式的地表邊界未考慮即時的海氣交互作用時，中長期雲雨結構發展的可預報性似乎會較差，即使增加大氣模式網格的解析度，預報準確度也難以提高。本研究使用模式偶合函式庫(The Model Coupling Toolkit, MCT)開發設計一套嶄新的全球海氣偶合數值預報模式，即時偶合中央氣象局的全球大氣預報模式與一全球海洋模式(台灣多尺度社區海洋模式, Taiwan Multi-scale Community Ocean Model, TIMCOM)來模擬海氣交互作用的動力過程與機制，並以馬登-朱利安震盪(Madden Julian Oscillation, MJO)現象做為模擬事件進行分析。研究結果顯示，大氣模式中若使用NSAS積雲參數化模型時，無論是在偶合或非偶合系統中，皆無法捕捉到馬登-朱利安震盪特有的雲雨帶東移的特徵，選用tiedtke積雲參數化模型時，偶合系統能準確的預估雲雨帶東移的時間點與強度，而非偶合系統生成雲雨帶東移的時間點會比觀測資料延遲10至15天。更深入的研究結果發現大氣模式所選用的積雲參數化模型種類能影響馬登-朱利安震盪的生成與否，而海氣交互作用的機制能影響大氣邊界層進而改變對流位置的地方，能使大氣模式捕捉到的現象更為接近真實觀測結果，證明海氣偶合系統對於中長期預報結果改善的效能。

關鍵字：海氣交互作用、偶合模式、數值預報、馬登-朱利安震盪(Madden Julian Oscillation, MJO)

一、前言

大氣層下邊界條件的處理對於全球大氣數值模式模擬的準確度有著顯著的影響，尤其當大氣層下邊界是海洋時，各種質量通量、熱通量與動量在大氣與海洋邊界之間的交換傳輸，產生了偶合系統的交互作用機制，從而驅動了大氣雲雨結構發展的動力演變過程，因此如何將海氣交互作用正確地結合到大氣數值模式中，一直都是發展新一代數值預報模式的重要課題[5]。

過往受限於計算機硬體效能的限制，要將即時完整的海氣交互作用納入大氣數值預報模式的運算中，需要耗費不符經濟效益的計算資源，變通的替代方案是使用氣候平均資料，或是簡化的海洋模式，來估算由海面進入到大氣系統邊界的熱通量。由於海洋動力演變的時間尺度大於大氣的變化時間，在執行數天短期的大氣數值模擬時，簡化處理海洋資訊的方法仍可維持一定程度的可預報性，然而，在面對中長期預報品質的需求時，需要偶合更細緻的海洋動力模式，才能反應出海氣交互作用長時間發展的累積對預報模擬結果的回饋[5]。

最近20年來，隨著高速平行計算系統的突破發展，使得即時海氣交互作用的偶合系統模式，逐漸變為預報作業可執行的選項，加上處理平行計算節點間資料傳輸介面函式庫的成熟應用，全球各地的主要預報作業單位與學術研究機構，紛紛投入了各自的海氣偶合系統模式的開發[2,3]。為發展台灣本土的海氣偶合系統，本研究在第2節敘述使用開源(open source)的模式偶合函式庫(The Model Coupling Toolkit, MCT)開發設計一套嶄新的全球海氣偶合數值預報模式，即時偶合中央氣象局的全球大氣預報模式與一全球海洋模式(台灣多尺度社區海洋模式, Taiwan Multi-scale Community Ocean Model, TIMCOM)來模擬海氣交互作用的動力過程與機制，第三節並以馬登-朱利安震盪(Madden Julian Oscillation, MJO)現象做為模擬事件進行分析，第四節進一步比對模擬與觀測資料來討論偶合模式對中長期預報結果的改善，最後對本研究進行總結並提出後續研究工作推動的方向。

二、海氣偶合系統架構與通量

(一)偶合系統的實作

在一個穩定的偶合系統中，當各組成模式(component model)在配置了不同的計算資源，而讓彼此的計算時間趨近於同步時，偶合資料在各組成模式之間的傳輸效率，將決定了整體系統效能的優劣。舉例來說，當大氣與海洋模式的網格解析度與配置的處理器數量皆不同時，熱通量資料必須先從大氣模式所屬的各處理器中進行整合，再執行對應到海洋模式網格的資料內插，最後將內插好的熱通量資料分送到海洋模式的處理器中。在實作上，這一連串的资料傳輸流程，會被整合到專門處理偶合資料的程式中做為系統架構中的偶合層，並使其運作能達到最佳效能[7,8,10]。

設計偶合系統模式架構的第一步，首先要評估偶合系統中預計將被納入的組成模式數量與網格特性，來規劃系統模式執行的流程。偶合系統的架構可以分為兩種 (1)獨立模式型：當組成模式或網格數量較多時，可將偶合層配置為系統中的一個組成模式，使用獨立的計算資源，其他的組成模式只與偶合層交換資料。此一架構可藉由獨立的計算資源來減少不同模式之間網格資料內插時間，並精簡資料傳輸的路徑；(2)模式介面型：當組成模式或網格數量較少時，組成模式之間直接地資料交換，將會是最有效率的執行方式，在此架構下，偶合層被配置為組成模式下的一個介面副程式，與組成模式使用相同的計算資源。

為提升台灣本土化海氣偶合系統模式在中長期預報的準確性，本研究所建置的偶合系統，採用中央氣象局的全球大氣預報模式(Central Weather Bureau Global Forecast System)與台灣多尺度社區海洋模式(Taiwan Multi-scale Community Ocean Model, TIMCOM)[9]，作為偶合系統中的組成模式。圖1為本研究所設計的系統模式架構，由於組成模式數量只有兩個，網格類型也都是單一的全球網格，無區域巢狀網格，因此在設計的架構上，採用模式介面型來進行開發。

偶合系統的實作會由一個主驅動器(Driver)來做為系統執行時的主程式，主驅動器調用開源的訊息傳遞介面函式庫(Message Passing Interface, MPI)來配置大氣與海洋模式所使用的計算資源，以及給定相關的系統資訊。中央氣象局的全球大氣模式與台灣多尺度社區海洋模式會被預先編譯為靜態函式庫，讓主程式在配置完計算資源後可以直接呼叫執行。

偶合層中的網格資料內插與傳輸是使用模式偶合函式庫(The Model Coupling Toolkit, MCT)來進行優化。MCT為美國能源部所支持發展的開源函式庫(open-source library)，其特點在於使用MPI開發了支

援平行運算架構下資料傳輸的各種介面程式，在開發偶合系統模式時能妥善的與MPI架構下的各類組成模式相接合，MCT以優化的資料平行傳輸效能與便利的使用方式被廣泛地使用在偶合系統模式的開發上。

(二)偶合系統中的傳輸通量

從發展海氣偶合系統數值模式的角度來看，這些海氣交互作用中所產生的通量，屬於施加在大氣與海洋模式交界面上的邊界條件，在邊界上所施加的通量大小與方向不僅會驅動並改變模式模擬的結果，更會影響了整個偶合模式中的質量與能量守恆的情況。作用在大氣與海洋模式交界面上的通量類型可以分為三大類：熱通量、質量通量與動量，這些通量同時作用在大氣與海洋模式之間，其量值大小相等，但在正負方向在模式中互為相反，通量作用在海洋模式海表面的數學表示式如下：

1. 熱通量(heat flux)：

$$\frac{\partial T_{surf}}{\partial t} = \frac{1}{c_p \rho_{sea}} \frac{\partial}{\partial z} (nsw - q_{flux} - h_{flux} - nlw) \quad \text{式(1)}$$

式1中 T_{surf} 為海表面溫度， C_p 與 ρ_{sea} 分別為海水比熱與密度， nsw 與 nlw 分為淨短波輻射(net shortwave radiation)與淨長波輻射(net longwave radiation)， q_{flux} 與 h_{flux} 分別是潛熱通量(latent heat flux)與可感熱通量(sensible heat flux)。式1所表現的物理意義是海表面溫度隨時間的變化，是受到熱通量在海面處垂直梯度變化的影響。

2. 質量通量(mass flux)：

$$\frac{\partial S_{surf}}{\partial t} = -34.7 \times \frac{\partial}{\partial z} (-evap + prec + river) \quad \text{式(2)}$$

式2中 S_{surf} 為海表面鹽度， $evap$ 為潛熱所造成的水氣蒸散， $prec$ 與 $river$ 分別代表降水與河川逕流。質量通量的變化並非直接反應在海水整體質量的變化，而是間接反應在以34.7為基準的海水鹽度變化上。

3. 動量(風應力)：

$$\frac{\partial \vec{U}_{surf}}{\partial t} = \frac{1}{\rho_{air}} \frac{\partial \vec{\tau}}{\partial z} \quad \text{式(3)}$$

大氣的動量會以風應力的形式作用在海洋表面上，改變海水表面的流速，式3中 \vec{U}_{surf} 代表海表面速度向量， $\vec{\tau}$ 與 ρ_{air} 分為風應力與空氣密度。

三、馬登-朱利安震盪的模擬

馬登-朱利安震盪為一發生在赤道熱帶地區的季內震盪(intraseasonal oscillation)，發生的週期約為30-90天，典型的特徵通常是會在印度洋的西側出現成對的對流區與非對流區，造成明顯的降雨區與抑制降雨區，並緩慢的朝東邊移動[6,11]。

圖2(a)繪製的是2011年11月12日至2011年12月27日在南緯10度至北緯10度中間的觀測降雨平均值。降雨資料顯示在11月23日左右，在經度70度印度洋附近的位置開始有降雨生成，並逐漸往東移動，直到進入太平洋之後才開始減弱，圖2(b)同時間的地球長波輻射觀測資料也顯示了雲雨帶東移的情形。馬登-朱利安震盪顯著的雲雨移動特徵是沿著赤道海面移動，受到海洋環境的交互作用較強，因此適合用來做為驗證耦合系統模式的案例分析。

大氣模式中，積雲參數化模組的選用，直接影響了雲動力機制與最終降雨的生成，為檢視積雲模組對海氣耦合系統回饋的影響，此次的模擬同時選用了tiedtke[1]與NSAS[4]兩種不同的積雲模組進行比對。模式模擬的初始時間是從2011年11月12日0時0分開始，至2011年12月27日0時0分結束，共計45天，大氣模式的網格解析度為0.375度，時間步階為180秒。海洋模式的網格解析度為1.125度，時間步階為480秒，海洋模式的初始場是使用HYCOM的分析資料，耦合資料交換的頻率則為2小時交換一次。

四、結果與討論

模擬結果的呈現總共分為四組，(1) NSAS無耦合大氣模式，(2) NSAS耦合系統模式，(3) tiedtke無耦合大氣模式，(4) tiedtke耦合系統模式。圖3彩色部分為模擬結果的降雨分布，黑色等高線為同時間降雨的觀測值，當使用NSAS積雲參數化模組時，不論是原全球大氣模式或是耦合系統模式皆無法反應出雲雨帶東移的特徵。使用tiedtke積雲參數化模組時，無耦合大氣模式已可捕捉到雲雨帶的東移，發生的時間相比實際觀測值延遲了約15天，在耦合系統下，不僅捕捉到更完整的雲雨帶東移的結構，馬登-朱利安震盪發生的時間點也與觀測資料相當接近，後續模擬結果會低估雲雨帶東移的速度，造成發展到後期逐漸偏離了觀測資料的範圍。

圖4進一步比對耦合系統使用tiedtke積雲參數化模組時，熱通量對雲雨結構發展的影響，圖中彩色的區塊標示著熱通量的分布，黑色等高線為相對應的模擬雨量。潛熱通量的變化與雨量的生成呈現正相關的分布，然而可感熱通量在耦合與非耦合的大氣模式中，皆沒有顯著的影響，這表示海溫的變化，主要是先改變了近海面的水氣狀態(例如：比濕)，從而增加了潛熱釋放，使得耦合模式能更準確的啟動

馬登-朱利安震盪的降雨結構。淨長、短波輻射受到雲雨遮蔽的影響，在降雨發生時輻射值都會較弱。

不同積雲參數化模組回饋至海表面溫變化的結果如圖5，由左至右分別是預報模擬第15、30、45天的海表面溫度減去初始場的海表面溫度。在使用tiedtke的模擬中，在西印度洋的北緯20度到赤道區域，海面溫度隨著時間逐漸降低，在南緯20度到南緯5度的地方，海表面溫度隨著時間逐漸增加，在赤道地區形成了成對的正溫差區與負溫差區，這樣的分布也與典型馬登-朱利安震盪的成對的對流區與抑制對流區有著高相似的對應性。使用NSAS的模擬中，在西印度洋的赤道地區也有發現類似上述成對的海表面溫差區，但是此部分的溫差區皆為正溫差，相對於初始海表面溫度依然是略高，表示在這個區域上，海洋主要是處於接受能量的狀態，大氣無法從海洋獲得足夠的能量形成對流，導致於抑制了馬登-朱利安震盪形成的條件。然而要更精確的解釋海表面成對的正溫差與負溫差區與大氣之間交互作用的機制，尚待需要更進一步的分析。

定量的比較是使用500mb位勢高度場、海表面壓力場與850mb溫度場的模擬結果與觀測資料進行方均根計算(root mean squares,R.M.S)，圖六的定量比較中，紅線是非耦合大氣模式與觀測資料的方均根，藍線是耦合系統模式的結果，在模擬進行的第五天之前，耦合與非耦合的資料幾乎一致，在模擬進行到10天之後，才開始有較大的震盪變化而產生差異，然而這樣的差異太小，並不足以能夠評斷耦合系統模式的準確度是否有更好的改善或是變差。

五、結論

本研究使用MCT函式庫開發建置一套全球海氣耦合數值預報系統，即時地耦合傳輸中央氣象局全球大氣預報模式與台灣多尺度社區海洋模式中，地表的熱通量、質量通量與動量等邊界通量資料，來驅動較為完善的海氣交互作用機制，以改善目前中央氣象局全球預報模式在中長期預報作業的能力。

在馬登-朱利安震盪的驗證分析上，耦合系統模式配合tiedtke積雲參數化模組，能準確的預估雲雨帶東移的時間點與強度，而非耦合系統生成雲雨帶東移的時間點會比觀測資料延遲10至15天。大氣模式所選用的積雲參數化模型種類能影響馬登-朱利安震盪的生成與否，而海氣交互作用的機制能影響大氣邊界層進而改變對流位置的地方，能使大氣模式捕捉到的現象更為接近真實觀測結果，證明海氣耦合系統對於中長期預報結果改善的效能。

後續工作將分析探討耦合系統中海面溫度的變化是如何受到積雲參數化的影響，有哪些海氣交互作用的機制產生，相關成果亦可提供做為大氣模式內參數化模組調校的方向。

六、參考文獻

1. Bechtold, P., N. Semane, P. Lopez, J.-P. Chaboureau, A. Beljaars, and N. Bormann, 2014: Representing equilibrium and nonequilibrium convection in large-scale models. *J. Atmos. Sci.*, 71, 734–753.
2. ESMF Joint Specification Team, 2014: ESMF Reference Manual for Fortran, NASA
3. L. Liu, G. Yang, B. Wang, C. Zhang, R. Li, Z. Zhang, Y. Ji, and L. Wang, 2014: “C-Coupler1: a Chinese community coupler for Earth System Modeling”, *Geosci. Model Dev. Discuss.*, 7, 3889-3936
4. Pan, H.-L. and W.-S. Wu, 1995: Implementing a mass flux convection parameterization package for the NMC medium-range forecast model. NMC office note 409 , 40 pp.
5. Saha, S., Morrthi, S., Wu, X., Wang, J., Nadiga, S., Tripp, P., Behringer, D., Hou, Y.-T., Chuang, H.-Y., Iredell, M., Ek M., Meng, J., Yang, R., Mendez, M. P., Van Den Dool, H., Zhang, Q., Wang, W., Chien, M. and Becker, E., 2014: “The NCEP Climate Forecast System Version 2”, *Journal of Climate*, 27, 2185
6. Seo, K.-H., and K.-Y. Kim, 2003: “Propagation and initiation mechanisms of the Madden-Julian Oscillation”, *J. Geophys Res.*, 108(D13), 4384
7. S. Valcke, T. Craig, and L. Coquart, 2015, OASIS3-MCT User Guide, CERFACS
8. Tony Craig, CPL7 User’s Guide, NCAR
9. Tseng*, Y. H. and M.H. Chien , 2011: “Parallel domain-decomposed Taiwan Multi-scale Community Ocean Model (PD-TIMCOM).” *Computer & Fluids*, 45(1), 77-83.
10. V. Balaji, 2002: The FMS Manual: A developer’s guide to the GFDL Flexible Modeling System, GFDL
11. Zhang, C., 2005: “MADDEN-JULIAN OSCILLATION”, *Rev. Geophys.* 43, RG2003

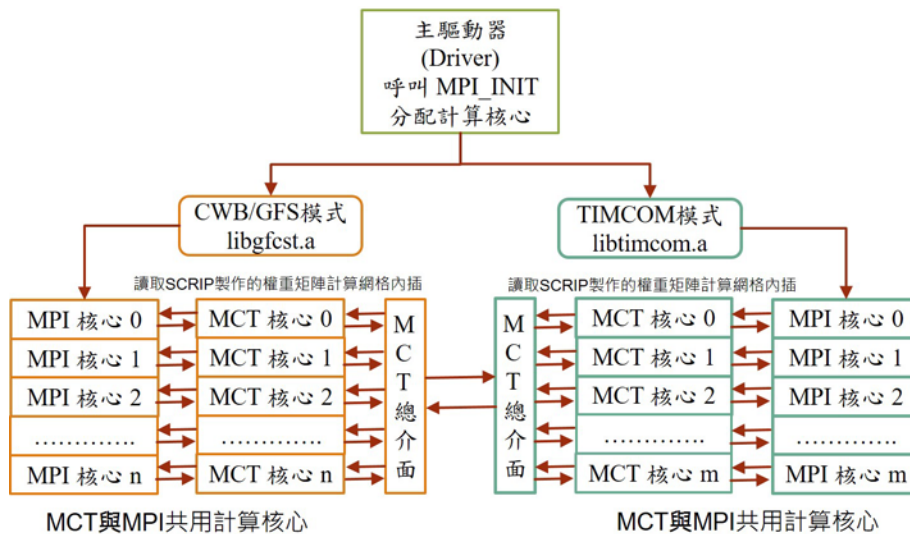


圖 1、全球海氣偶合模式系統架構圖

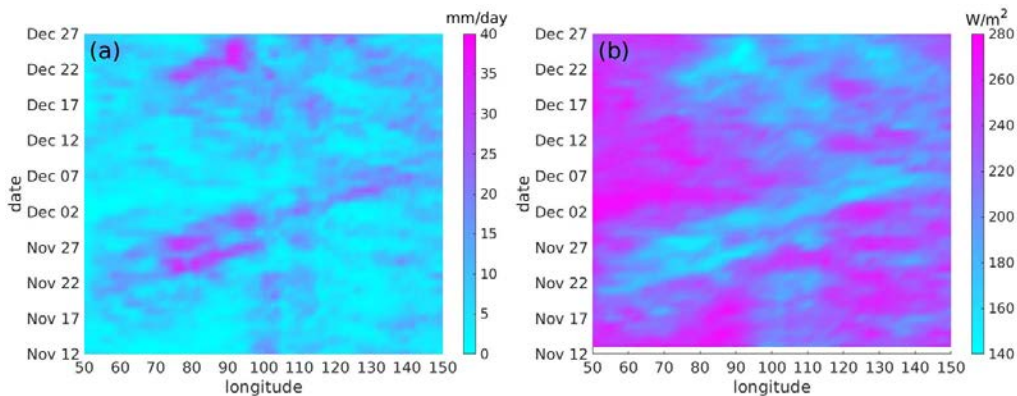


圖 2、10S-10N 觀測平均資料(a) 雨量 (b) 地球長波輻射(outgoing longwave radiation)

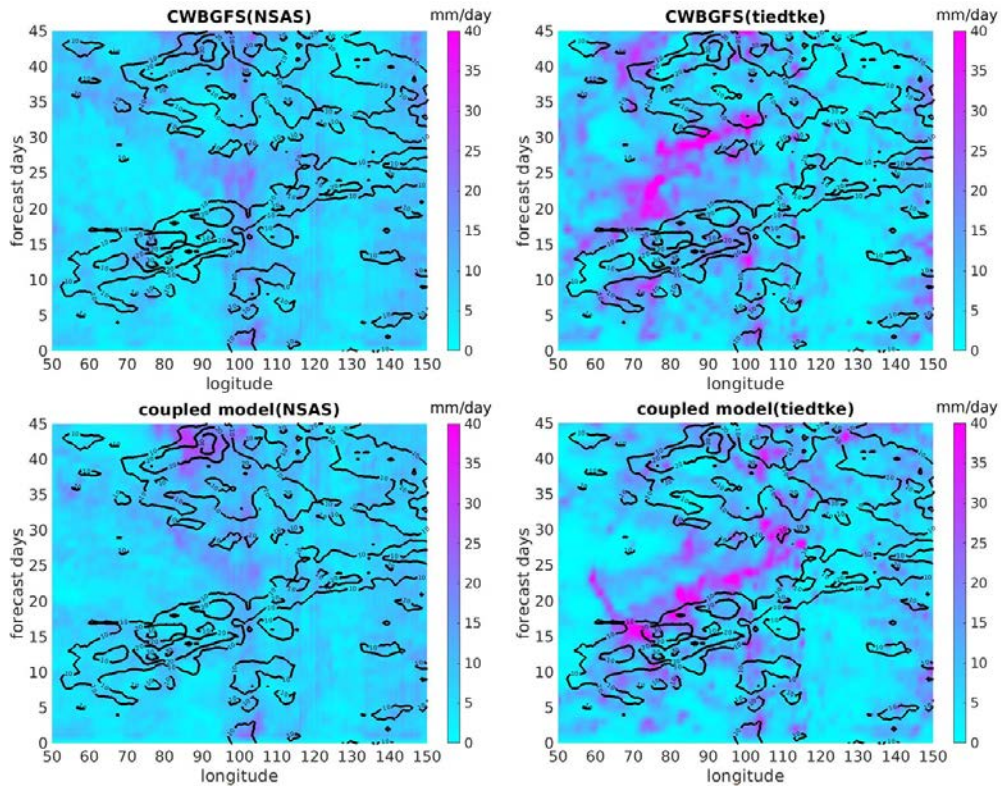


圖 3、非偶合(CWBGFS)與偶合(coupled model)模式選用不同積雲參數化模組的降雨結果，彩色區塊為模式模擬的降雨量，黑色等高線是觀測雨量值。

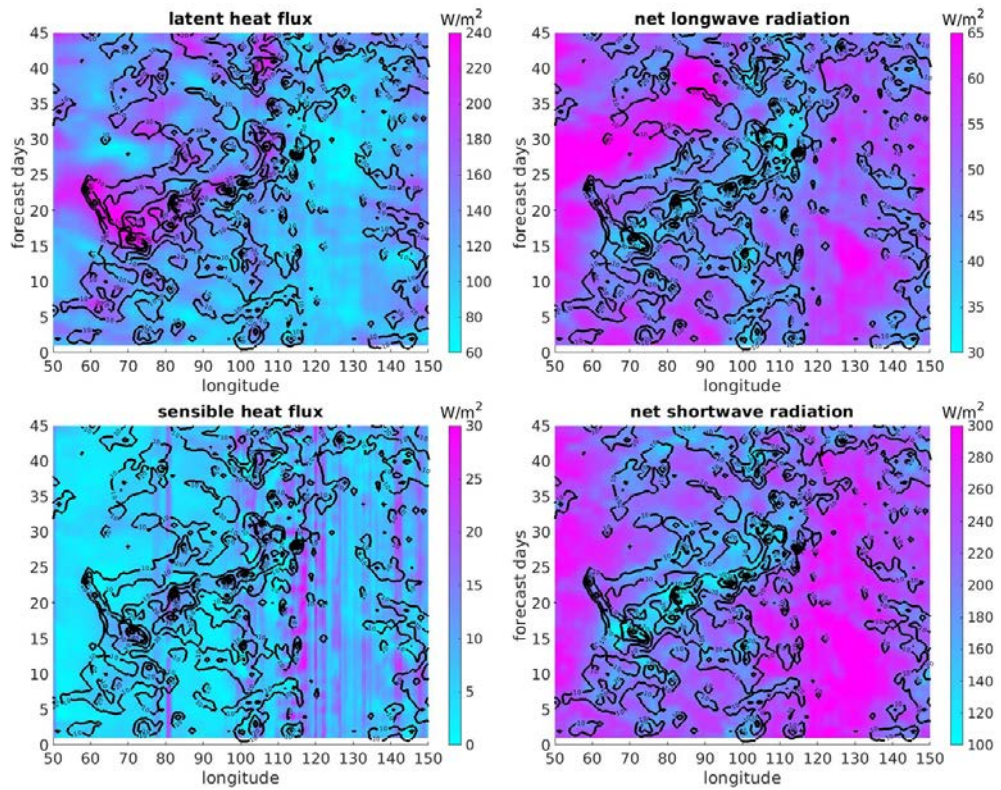


圖 4、偶合系統中使用 tiedtke 積雲參數化模組之雨量分布與熱通量比對圖，彩色區塊是模式計算的熱通量，黑色等高線是模擬的降雨量。

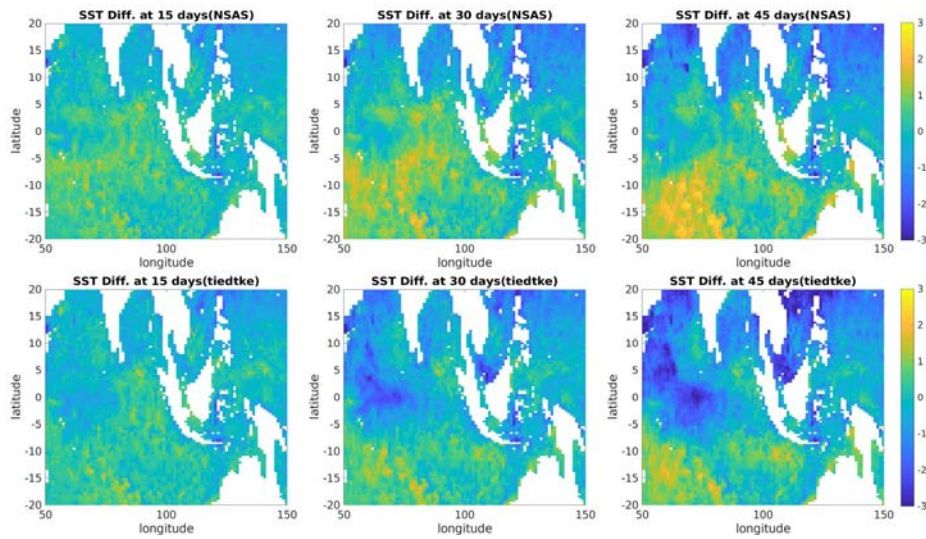


圖 5、偶合系統中使用不同積雲參數化模組之海水表面溫度變化圖，溫度變化為海溫減去初始場海水表面溫度的結果。

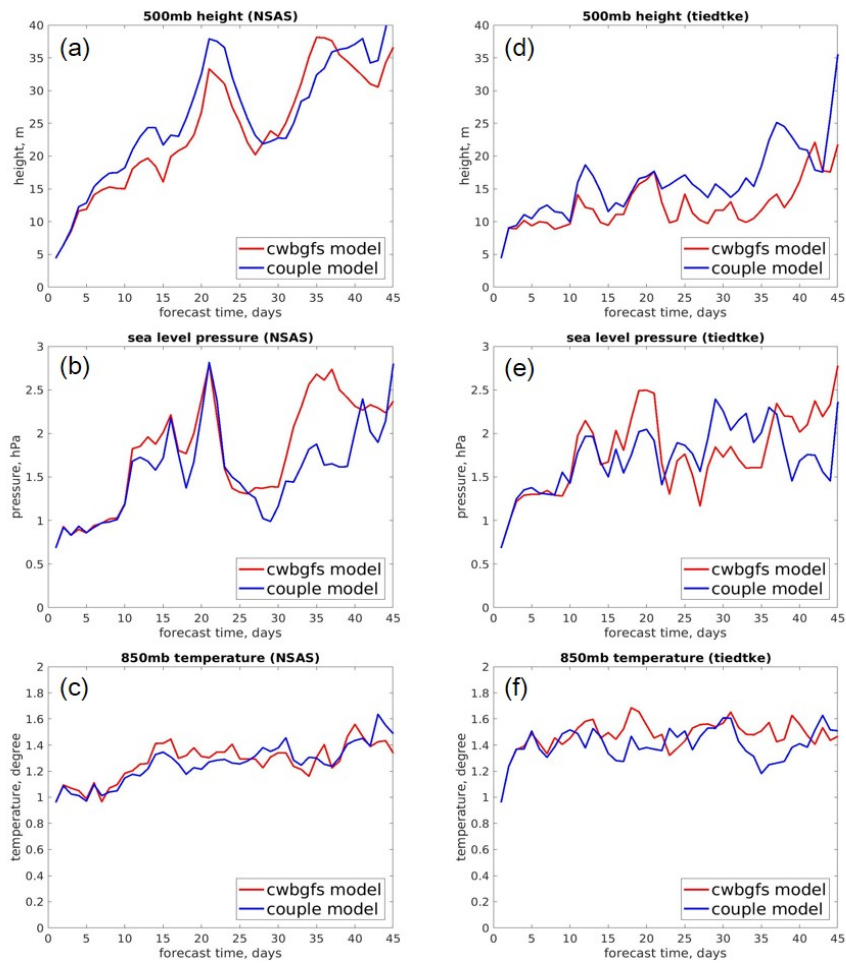


圖 6、偶合與非偶合系統選用 NSAS 與 tiedtke 積雲參數化模組之模式模擬結果與觀測資料的方均根誤差