

# 第二代海氣耦合模式發展現況

童雅卿 胡志文 吳家苓 陳薇鈞  
氣象科技研究中心  
中央氣象局

## 摘要

時代變遷，隨著科技進步，科學家發現氣候對人類生活影響重大。氣候的變化，大氣海洋交互作用扮演著重要的角色，因此各國氣候模式均採用大氣與海洋模式耦合系統。過去幾年，中央氣象局也發展出一個完整大氣海洋耦合模式，並上線作業，定時提供預報員對未來氣候趨勢之預報參考資料。於此同時，中央氣象局亦致力於發展下一代海氣耦合模式，利用更複雜完整的大氣模式與更精確之海洋模式耦合，希望未來能提供更準確的氣候預報。

第二代海氣耦合模式初步建置完成，採用更高垂直解析度的大氣模式與更先進的海洋模式MOM5進行耦合。大氣模式引進新的RRTMG輻射參數法、新版淺對流參數法、Tiedtke積雲參數法，並採用更先進hybrid垂直層座標，將垂直層數由40層增加到60層。MOM5海洋模式較第一代所使用之MOM3模式動力與物理架構考慮得更加完整，並同時包含海冰模式與海洋模式。大氣模式與海洋模式的耦合方式也由第一代一天耦合一次而變成每個積分步距與海冰模式耦合一次，每3個積分步距與海洋模式耦合一次，更能模擬海氣交互作用，接近實際狀況。

將此海氣耦合模式進行30年積分，檢視其30年平均氣候場，並與ERA interim再分析場進行比較。初步發現溫度、降水等各變數場之分佈型態大致與ERA interim相似，差值場顯示部分差異需要更深入研究。目前大氣模式面臨最大問題可能是能量失衡。整個大氣預報吸收太多的太陽短波輻射，而散發出的長波輻射不足，造成整個大氣與陸地處於加熱的狀態，溫度場顯示有明顯的偏暖現象。能量的失衡可能與雲量有關，如何處理雲量與輻射的關係可能是未來必須重視的課題。

關鍵字：一步法海氣耦合模式、氣候場

## 一、前言

中央氣象局第一代海氣耦合模式為一步法海氣耦合模式，大氣部分採用氣象局所發展之全球模式；海洋部分則是採用 GFDL 的 Module Ocean Model version 3(MOM3)模式。

在此耦合系統所使用之大氣模式其動力架構為波譜模式，東西方向水平解析度約 100 公里，南北方向採 Gaussian 格點，其間距隨緯度而異，垂直層數為 40 層。模式對各種物理過程所使用之參數法包括積雲參數法為 New Simplified Arakawa-Schubert scheme (Pan and Wu 1995, Han and Pan 2011)，Noah 4 層土壤模式(Ek et al.,2003)，非局部邊界層參數法(Toren and Mahrt 1986)，淺積雲參數法(Li 1994)，雲水預報決定網格尺度降水參數法(Zhao and Frederick 1997)，重力波拖曳參數法(Palmer et al 1986)及 Fu and Liou 輻射參數法(Fu 1997; Fu and Liou 1992,1993)。

海洋模式為 GFDL 的 Module Ocean Model version 3 (MOM3)模式。其東西方向水平格點間距為 100 公里，南北方向為 Gaussian 格點，隨緯度而異，於熱帶地區有較高的解析度，預報範圍限於南緯 70 度至北緯 60 度之間的海洋。海洋模式垂直 40 層，最底層約在 4428 公尺。預報變數包括海流速度、海水溫度與鹽度，採 c.g.s 制。海洋模式預報海面溫度，為大氣模式之下邊界。因受限於預報範圍，在南緯 70 度

以南及北緯 60 度以南地區的海面溫度則用 OISSTv2 海面溫度之 30 年日平均資料來給定。

大氣模式初始資料採用 CFSR 之分析資料。海洋模式的初始資料由 NCEP MOM4 之分析資料內插而來。大氣模式預報一天後，提供大氣預報動量通量(momentum flux)、可感熱通量(sensible heat flux)、潛熱通量(latent heat flux)、降水量(precipitation)、太陽輻射(solar radiation)、長波輻射(long-wave radiation)等資訊給海洋模式，海洋模式預報一天後，提供海面溫度預報日平均資料給大氣模式，如此反覆，可進行長期積分。目前此海氣耦合模式已正式上線作業，每天進行一組 9 個月預報。每個月 30 組預報進行 ensemble 出一組預報資料，提供長期預報課對未來氣候變化預測之參考。

科技日新月異，中央氣象局所使用之大氣模式不斷進步，與第一代海氣耦合模式所使用之版本已有很大差異。海洋模式亦有更完善之版本，而海洋與大氣耦合之方式也有新的技術發展，因此中央氣象局致力發展新一代海氣耦合模式，使用更先進的大氣和海洋模式與耦合技術，期望未來能提供更精確之氣候預報資料給預報員參考。

## 二、模式簡介

### (一) 新版大氣模式

第二代海氣耦合模式所採用之大氣模式與第一代海氣耦合模式之大氣模式類似。其動力部分仍為波譜模式，但其垂直座標使用 hybrid vertical coordinate 來取代  $\sigma$  coordinate，垂直層數也從 40 層增加到 60 層。

在物理參數法方面，也有更多的選擇。在積雲參數法除了原有 New Simplified Arakawa-Schubert scheme 和 Simplified Arakawa-Schubert scheme 外，也增加了 Tiedtke 積雲參數法(Tiedtke 1989)之選項。淺積雲參數法也有新的版本可供嘗試。輻射參數法除了 Fu and Liou 輻射參數法外更引進了 RRTMG 輻射參數法(Iacono et al., 2008)。

此大氣模式與舊版之差異，如表 2-1 所示。

表 2-1 新舊版大氣模式之比較

項目	新版	舊版
垂直層數	60	40
垂直座標	hybrid vertical coordinate	$\sigma$ coordinate
輻射參數法	Fu & Liou RRTMG	Fu & Liou
積雲參數法	SAS NSAS Tiedtke	SAS NSAS
土壤模式	NOAH 4 layer model	NOAH 4 layer model
淺積雲參數法	old shallow convection scheme new shallow convection scheme	new shallow convection scheme

### (二) MOM5 海洋模式

第二代海氣耦合模式所採用之海洋模式為 GFDL 的 Module Ocean Model version 5(MOM5)模式。MOM5 模式和 MOM3 模式之架構完全不同，有更平行化的程式設計，更周詳之物理過程，不僅考慮海洋的變化，也加入海水模式。

本研究使用 MOM5 模式之特性整理於表 2-2。其東邊界起於東經 80.24 度，異於大氣模式的東經 0 度，其水平解析度為 0.5 度，較 MOM3 模式的 1 度為高。南北方式在極區並不做預報。垂直方向同為 40 層，同樣最深至 4478 公尺深，但採 Quasi-horizontal rescaled height 座標，而非 MOM3 之高度座標。

MOM5 模式包含海水模式與海洋模式，海水模式與大氣模式耦合時間與大氣模式之積分時距一致，而海洋模式與大氣模式的耦合時間則是 3 倍於大氣模式積分時距。若大氣模式為 T119 波譜模式，其積分時距為 600 秒，則海水模式每 600 秒和大氣模式耦合一次，海洋模式則是 1800 秒才和大氣模式耦合一次。

### (三) 耦合架構

MOM5 模式採用較先進的 Staggered two time level scheme 時間積分方法能對保守海洋質量、體積、海溫與鹽度。

第二代海氣耦合模式採用中央氣象局所發展之大氣模式(GFS)和 GFDL 之 MOM5 海洋模式進行偶和，耦合步驟為 MPMD(Multiple Program - Multiple Data)架構。

第二代海氣耦合模式之架構，有一個耦合器(coupler)控制大氣預報資料與海洋模式預報資料之交換。

於第一代海氣系統裡大氣模式積分完一天，才把一天的平均大氣資料傳海洋模式，海洋模式積分完一天才重新啟動大氣模式之積分，如此反覆。海洋模式與大氣模式並不能同步進行積分，需耗費更多的積分時間，且資料僅能使用一天的平均值當做模式之作用力(forcing)，較不符合實際狀態。

第二代海氣耦合模式所採用之 MPMD(Multiple Program - Multiple Data)架構則是利用超級電腦之平行處理架構讓大氣模式和海洋模式能同步進行積分，每個積分步距即進行海洋與大氣資料之交換，更接近真實世界所發生之情況。

大氣模式每個積分時距與 MOM5 海水模式耦合一次，大氣模式會傳輸地表溫度、大氣最底層溫度、水汽、風、氣壓、高度和地表向下短波輻射、長波輻射與動量、能量交換係數、降水量、降雪量等資訊提供給 MOM5 海水模式。海水模式會藉由這些資訊計算其所需之淨地表短波輻射、淨地表長波輻射、可感熱通量、潛熱通量、動量通量等資料進行預報。海水模式會將預報之格點海水比率(ice fraction)傳回給大氣。

大氣模式每 3 個積分時距才會跟 MOM5 海洋模式耦合一次，因此所傳給海洋模式的資料為此 3 個積分時距之大氣平均狀態，包括淨地表短波輻射、淨地表長波輻射、可感熱通量、潛熱通量、動量通量等資訊給海洋模式。海洋模式也會傳回海面溫度給大氣模式做為下邊界資料。

如此藉由大氣海洋模式預報資料之交換來模擬真實大氣海洋交互作用，進行更合理之氣候預報。

## 三、實驗設計

本系統尚屬於研究發展階段，目前已可進行長期預報，但海洋初始資料之準備程序尚未建立，目前僅有拿自 NCEP 之單一個案之海洋初始資料 (西元 2015 年 4 月 1 日 00 時個案)來建置系統，進行測試。

本研究之測試版本，大氣模式為 T119 波譜模式，物理過程採用 NSAS 積雲參數法、RRTMG 輻射參數法和舊版之淺積雲參數法。利用此版本進行 30 年積分，並對其氣候場進行診斷分析。

本研究採用 ERA interim 再分析資料、OISSTv2 的海面溫度、與 GODAS(Global ocean data assimilation system)海洋資料，於西元 1982 至 2011 年之 30 年平均資料來進行校驗。另外，也使用 ISCCP(International Satellite Cloud Climatology Project)西元 1984 年至 2013 年衛星資料所反演出之雲量分佈，來進行校驗。由於主要檢視各變數氣候特徵，與觀測資料時間差異並不影響校驗結果。

以下將模式預報結果簡稱為測試版，與各種分析資料進行診斷分析。

## 四、氣候場診斷與分析

圖1為耦合模式測試版積分31年全球平均海面溫度之變化趨勢。圖中顯示全球平均海溫隨時間持續增溫，31年約增溫1.54°C，其最大增溫趨勢發生在積分前3年。

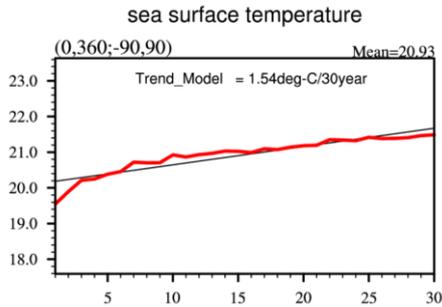


圖1、全球平均海面溫度隨時間之變化圖。紅線為模式預報值；黑線為其趨勢線。橫軸為積分年。

檢查30年平均海面溫度場與ERA interim資料的比較。測試版能模擬出赤道暖，極區冷之南北溫度梯度與赤道西太平洋的暖區等主要氣候特徵。測試版氣候場與ERA interim氣候場的相關係數可達0.98。型態相似，但差值場亦顯示除了北極海外，大部分海洋均明顯偏暖。

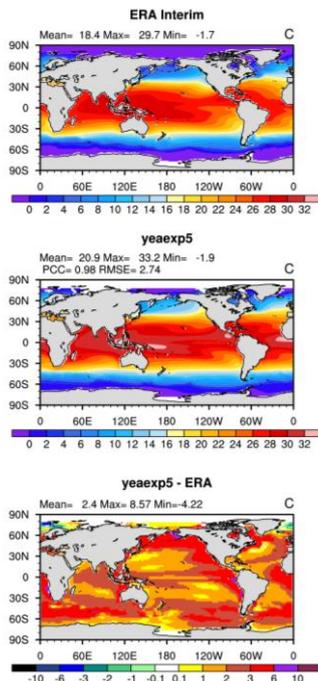


圖2、海平面溫度氣候場。上圖為ERA interim 資料，中間為測試版30年平均場，下圖為測試版氣候場減去ERA interim之差值場。Mean為全球平均值；Max為最大值；Min為最小值；PCC為AMIP與ERA-interim之相關係數；RMSE為root mean square error。

過暖的海面溫度氣候場反映出測試版之能量收支可能失衡，因此需進一步檢查測試版之能量收支。首先比較大氣層頂向下之太陽短波輻射，可以發現不論是ERA interim或測試版結果，其最大值均在熱帶，與緯度線平行(圖3)。差值場顯示測試版氣候場在全球均較ERA interim弱，南北高緯地區差異較明顯，全球平均差值約2.5W/m<sup>2</sup>，表示測試版所接收到的太陽能較少。

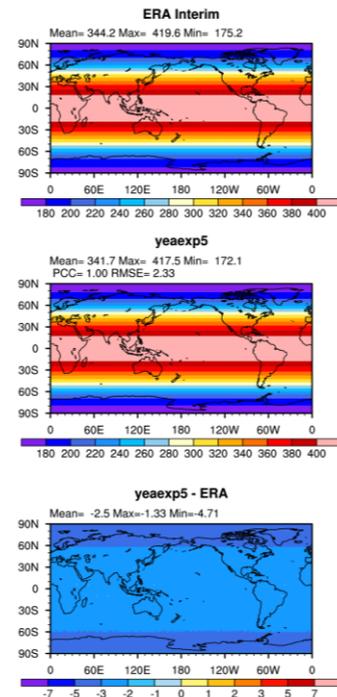


圖3、如圖2，但為大氣層頂向下之太陽短波輻射。

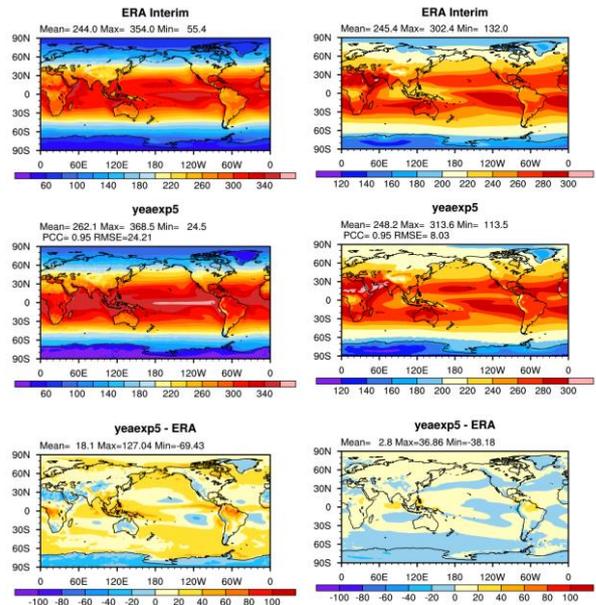


圖4、如圖2，但為大氣層頂太陽淨短波輻射(左圖)和地球長波輻射(右圖)。

大氣層頂地球所吸收之太陽短波輻射與地球本身所散發之長波輻射，二者數值必須相當，代表地球本身能量維持一種平衡狀態。檢視此二氣候場，如圖4所示，ERA interim再分析資料顯示地球所吸收之太陽短波輻射為 $244\text{W/m}^2$ ，地球長波輻射為 $245.4\text{W/m}^2$ ，二者大致相當。但目前所發展之海氣耦合模式則顯示地球所吸收之太陽短波輻射為 $262.1\text{W/m}^2$ ，地球長波輻射為 $248.2\text{W/m}^2$ ，二者相差 $14.9\text{W/m}^2$ 。吸收過多的太陽輻射，可能是造成海面溫度不斷升高之主因。

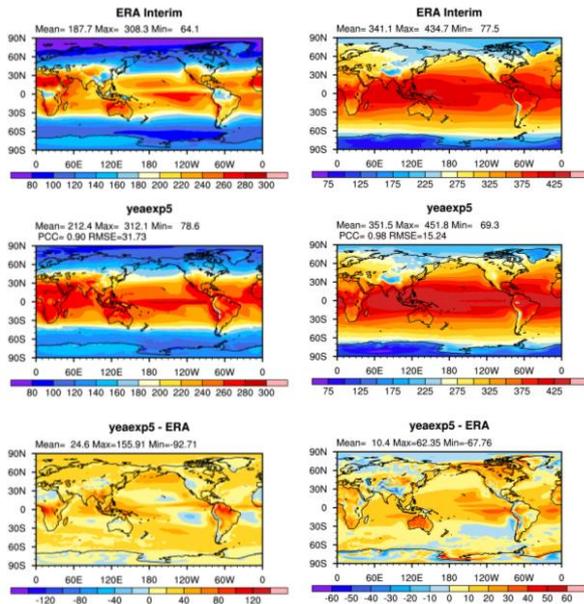


圖5、如圖2，但為地表太陽向下短波輻射(左圖)和地表向下長波輻射(右圖)。

地表向下的短波輻射為大氣層頂向下之短波輻射經大氣阻擋所到達地表的部分，圖5左之差異場顯示測試版的地表向下短波輻射在全球大部分區域均較ERA interim大。大氣層頂向下之短波輻射較ERA interim小(圖3)，但到達地表短波輻射卻偏大，代表著大氣對短波輻射之反射不足。

檢視地表向下長波輻射，如圖5右所示，可以發現在北緯30度以南，測試版較ERA interim得到更多的長波輻射，其主要來源為大氣的貢獻。此過量的向下長波輻射進一步加熱地表。

大氣對短波輻射阻擋不足，卻貢獻更強的長波輻射加熱地表，其原因值得進一步探討。

首先檢視總雲量、低雲、中雲和高雲之水平分佈，如圖6、7所示。雖然測試版對各種雲之定義和ISCCP定義可能不太一致，但其差異不大，在此仍可參考比較。

垂直總雲量的比較可以發現測試版之總雲量普遍偏少(圖6左)，在赤道南北兩側偏多的區域，恰和地表向下短波輻射偏少的位置一致(圖5左)。由於總雲量偏少，短波輻射反射不足，過多能量加熱地表。

高雲於測試版則是全球偏多(圖6右)。高雲為冰雲，其作用主要阻擋地球長波輻射之發射。高雲偏多，亦不利於地球降溫。

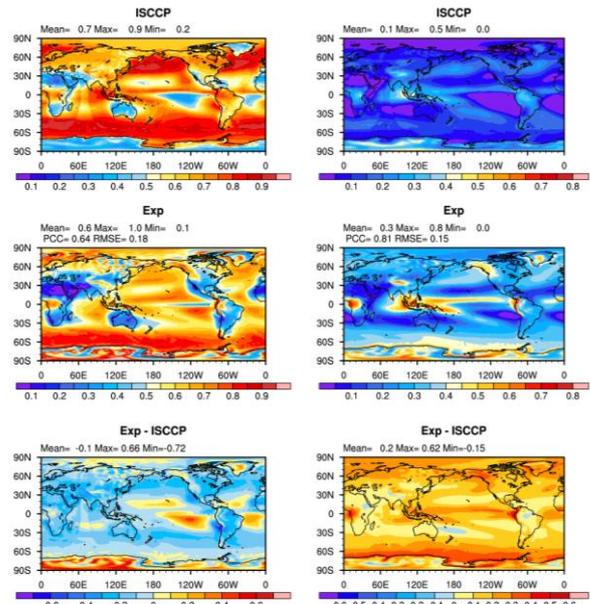


圖6、如圖2，但為總雲量(左圖)和高雲(右圖)氣候場。上圖為ISCCP資料，中間為測試版30年平均場，下圖為測試版氣候場減去ISCCP之差值場。Mean為全球平均值；Max為最大值；Min為最小值；PCC為AMIP與ERA-interim之相關係數；RMSE為root mean square error。

中雲分佈則與高雲完全相反，普遍偏少，南極洲則太多(圖7左)。

ISCCP資料顯示各個陸地、秘魯與加州外海有明顯低雲存在(圖7右)。測試版顯示海洋上低雲明顯過多，但在陸地、秘魯與加州外海則偏少。

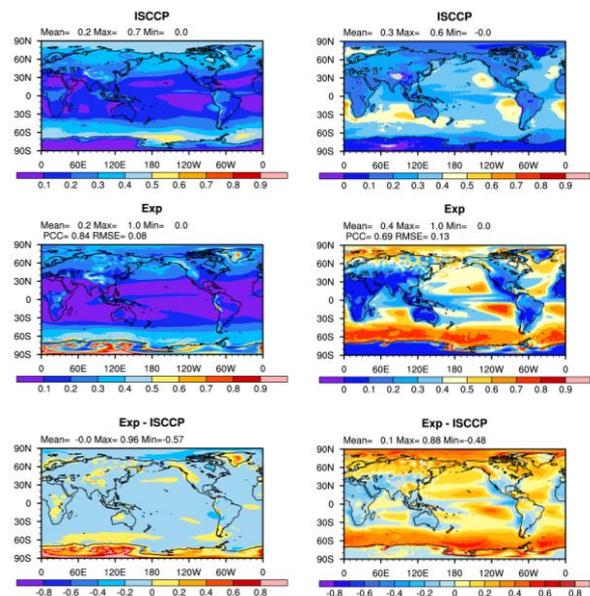


圖7、如圖6，但為中雲(左圖)和低雲(右圖)。

在影響輻射的因子中水汽扮演著重要的角色，水的三相同時存在大氣，不同相位對輻射之影響不同。圖8顯示水汽場經向平均後之緯向垂直分佈。測試版的水汽明顯過多。除了南緯70度以南，水汽均明顯多，其高度可延伸到300百帕，隨緯度而異。

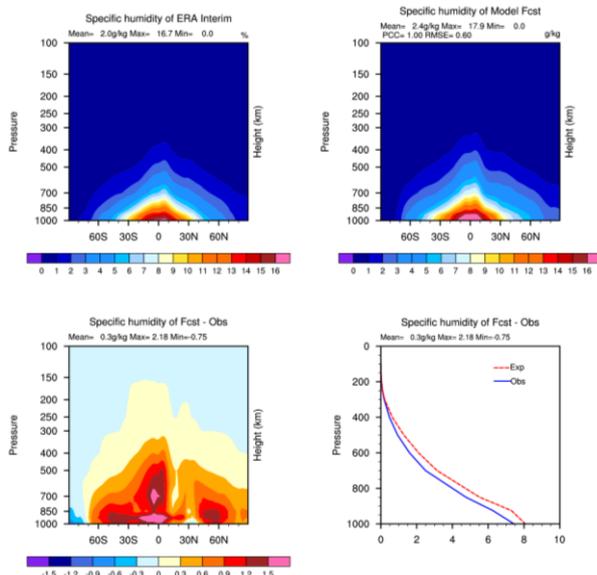


圖8、經向平均之水汽緯向垂直剖面圖。左上為ERA interim；右上為測試版；左下為測試版剪去ERA interim之差值場；右下為全球平均水汽場之垂直曲線。

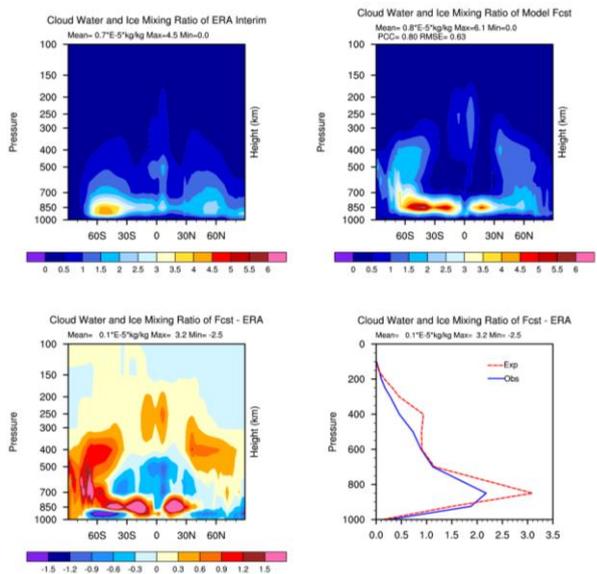


圖9、如圖8，但為雲水和雲冰之混合比。

檢查雲水與雲冰之垂直分佈，ERA interim顯示赤道上空與南北緯50度附近伴隨上升運動有較多的雲水和雲冰(圖9左上)。測試版則顯示最大的雲水分佈誤差在北緯30度以南、850百帕附近(圖9右上)，此區域與水汽差值場所顯示最大水汽偏多區相當一致。由於過多的水汽，造成過多的雲水。

但在赤道上空，與南北緯40度間700百帕至400百帕的範圍測試版的雲水與雲冰則明顯偏少(圖9左下)，與圖6顯示一致，中雲偏少，可能造成短波輻射阻擋不足的原因之一。

赤道上空雲水偏少，此與測試版積雲參數法之設定可能相關，水汽被積雲參數法轉換成積雲降水，無法反應成大尺度降水形成雲水有關。

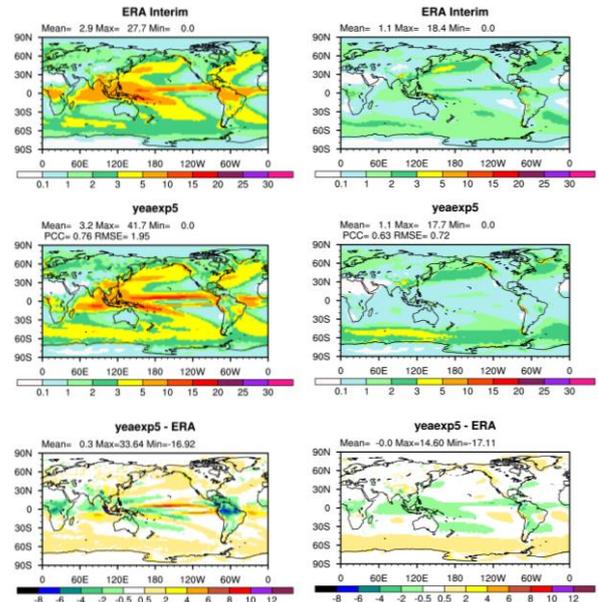


圖10、如圖5，但為總降水場(左圖)和大尺度降水場(右圖)。

檢查全球降水分佈，如圖10左所示，則可以發現測試版預報與ERA interim氣候場大致相近，最大降水在赤道ITCZ與西太平洋暖區和印度洋。但測試版有double ITCZ之問題，ERA interim亦有類似問題。差值場顯示赤道西太平洋降水偏少，赤道中、東太平洋則降水偏多。亞馬遜流域降水偏少，南北緯30度以外，降水偏多。

比較全球降水差值場與大尺度降水差值場，可以發現赤道ITCZ(Intertropical Convergence Zone)與SPCZ(South Pacific Convergence Zone)，大尺度降水明顯偏少，也就是此區之降水由積雲過程所產生。積雲激發機制是否過於容易，侵蝕大尺度降水的貢獻，造成雲量分佈偏差，進而影響地球能量收支，值得未來測試探討的方向。

## 五、結論

第二代海氣耦合模式已初步建置完成，採用更高垂直解析度的大氣模式與更先進的海洋模式MOM5進行耦合。大氣模式引進新的RRTMG輻射參數法、新版淺對流參數法、Tiedtke積雲參數法，並採用更先進hybrid垂直層座標，將垂直層數由40層增加到60層。MOM5海洋模式較第一代所使用之MOM3模式動力與物理架構考慮得更加完整，並同時包含海冰模式與海洋模式。大氣模式與海洋模式的耦合方式也由第一代一天耦合一次而變成每個積分步距與海冰

模式耦合一次，每3個積分步距與海洋模式耦合一次，更能模擬海氣交互作用，接近實際狀況。

將此海氣耦合模式進行30年積分，檢視其30年平均氣候場，並與ERA interim再分析場進行比較。初步發現溫度、降水等各變數場之分佈型態大致與ERA interim相似，差值場顯示模式存在的問題需要更深入研究。

目前測試版本面臨最大問題可能是能量失衡。整個大氣預報吸收太多的太陽短波輻射，而散發出的長波輻射不足，造成整個大氣與陸地處於加熱的狀態，溫度場顯示有明顯的偏暖現象。能量的失衡可能與雲量有關，也與積雲參數法、大尺度降水等物理過程息息相關。

本研究僅為第二代一步法海氣耦合模式之初步結果，模式尚存在若干問題，需進一步研究與改進。

## 六、參考資料

- Adcroft, A., Campin, J.-M., 2004. Rescaled height coordinates for accurate representation of free-surface flows in ocean circulation models. *Ocean Modelling* 7, 269–284.
- 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.
- 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.
- Fu, Q., K. N. Liou, M. C. Cribb, T. P. Charlock, and A. Grossman, 1997: Multiple scattering parameterization in thermal infrared radiative transfer. *J. Atmos. Sci.*, 54, 2799–2812.
- 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.
- 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.
- Li, B., and R. Avissar, 1994: The impact of spatial variability of land-surface characteristics on land-surface heat fluxes. *J. Climate*, 7, 527–537.
- 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.
- Stacey, M. W., Pond, S., Nowak, Z. P., 1995. A numerical model of the circulation in Knight Inlet, British Columbia, Canada. *Journal of Physical Oceanography* 25, 1037–1062.
- Tiedtke, M., 1983: The sensitivity of the time-mean large-scale flow to cumulus convection in the ECMWF model. *Proc. ECMWF Workshop on Convection in Large-Scale Models*, Reading, United Kingdom, ECMWF, 297–316.
- , 1989: A comprehensive mass flux scheme for cumulus parameterization in large-scale models. *Mon. Wea. Rev.*, 117, 1779–1800.
- Troen, I. and L. Mahrt, 1986: A simple model of the atmospheric boundary layer; sensitivity to surface evaporation. *Boundary-Layer Meteorol.*, 37, 129–148.
- Zhao, Q., and F. H. Carr, 1997: A prognostic cloud scheme for operational NWP models. *Mon. Wea. Rev.*, 125, 1931–1953.