

知識天地

臺灣氣候模擬系統——探索氣候的前世今生與來世

許晃雄特聘研究員（本院環境變遷研究中心）

摘要

本院環境變遷研究中心發展完成：一、臺灣地球系統模式，探索影響古今氣候變化的機制，推估人類持續排放過多溫室氣體可能導致的氣候變遷趨勢；二、全球高解析大氣模式，評估全球暖化對臺灣天氣與氣候的衝擊。此二模式將用來參加國際耦合模式比對計畫第六期研究，推估未來氣候變遷，提供給聯合國氣候變遷跨政府專門委會（IPCC）第六次評估報告參考。下階段工作為發展跨空間與時間尺度的無接縫模擬系統，協助推動臺灣的氣候、天氣、空氣汙染模擬與預測研發。

一、氣候變遷的威脅

由於全球環境的快速變化與近幾十年來的快速全球暖化現象，全球氣候變遷已經成為世界各國政府的科技研究發展首要項目之一。其中又以推估未來區域氣候變遷趨勢與衝擊為主要研發方向。這項工作必須建立在完整的模式群組基礎之上。理想中的模式為高解析度地球系統模式，不僅空間解析度高達數公里，也必須能完善地模擬影響氣候系統（包括大氣、海洋、冰雪、陸地、生態與人為影響等）的各種正反回饋過程，以及極端天氣與氣候的特性。此一構想打破傳統觀念，不再將大氣現象依照時間與空間尺度，區分為中尺度（如豪雨）、天氣尺度（如颱風、梅雨鋒面）與氣候尺度（如聖嬰現象），因為這些尺度間有顯著的交互影響，無法單獨存在。此即為所謂的無接縫模擬，也是氣候模擬與推估研究的終極目標。Shapiro 等人在2010年提出推動Weather, Climate and Earth-System Observations and Prediction Project的必要性，以便面對氣候變遷挑戰，其中一項即為無接縫天氣氣候預報系統的發展，目的為解析目前模式無法詳細模擬的中小尺度系統，並將該計劃與阿波羅、基因圖譜與哈伯望遠鏡等計劃相提並論。

面對全球暖化可能造成的氣候變遷，以及其對極端天氣氣候與地球環境的影響，首要任務之一為大幅改善對「氣候變異／變遷對區域劇烈天氣統計特性的影響」的預測與推估能力。為因應此一空前挑戰，科技部於2011/12-2015/16年進行氣候變遷研究聯盟計畫，並在中央研究院成立氣候變遷實驗室，負責臺灣氣候模擬系統之研發，建構臺灣的氣候變遷模擬與詮釋的能量與能力。目標為能透過一組由大至小的模式群組，研判全球氣候變遷對東亞氣候與季風、臺灣極端天氣（如颱風、豪雨、乾旱等）的可能衝擊，並提供這些資訊給國內研究社群，評估氣候變遷對臺灣生態環境、經濟社會與人民福祉的衝擊，並規畫／推動調適與減緩機制。

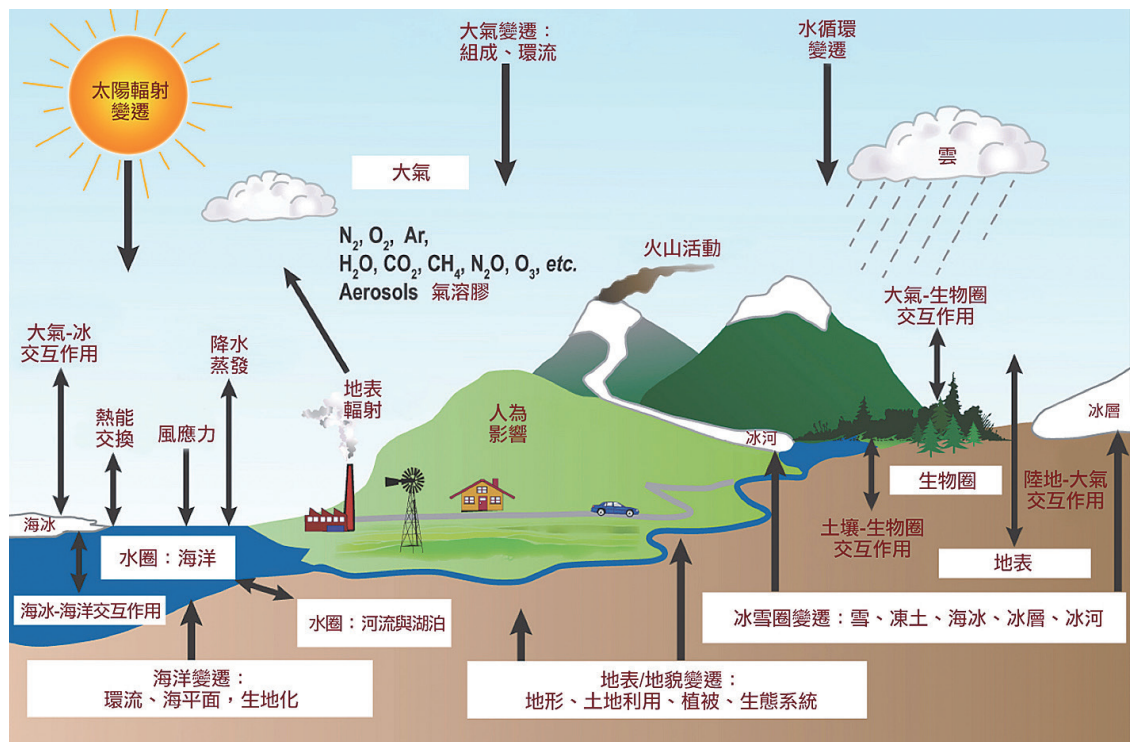
二、臺灣氣候模擬系統的建構：強化能力、探索變化、推估未來

長期以來，國內在氣候模式發展方面投入心力有限，且此項工作牽涉層面甚廣，不是單一研究計劃或單位可以承擔，必須結合國內的相關的研發人力，充分分工合作，才有可能完成。為了在有限人力物力資源與時程限制下，極大化研究成果，氣候變遷實驗室採取以下策略建構臺灣氣候模擬系統：

- （一）國內研究人力整合：以本院環境變遷研究中心氣候變遷實驗室為核心，與國內各大學研究人員合作，建立模式開發平台。
- （二）以既有模式為發展基礎：引進美國國家大氣研究中心的社群地球系統模式（CESM1）與美國海洋與大氣局地球物理動力實驗室的高解析大氣模式（HiRAM），與原開發單位密切合作，改善模式中的物理模組，使之成為國內可以自行研發改進的社群氣候模式。

1. 臺灣地球系統模式 (Taiwan Earth System Model, TaiESM)

地球系統模式顧名思義包括大氣、海洋、陸地、冰雪、植被等氣候子系統，不僅模擬各子系統內的複雜物理與化學過程，且能模擬各子系統間的交互作用，以及人為或自然溫室氣體與氣膠排放對氣候的影響（圖一）。這類模式後者也是



圖一：地球系統模式模擬的氣候物理與化學過程(修改自2007年IPCC報告)

聯合國氣候變遷跨政府專門委員會（IPCC）評估與撰寫歷次氣候變遷評估報告的主要依據。

氣候變遷實驗室建構、解構與重新建構臺灣的地球系統模式，同時建立了國內氣候模擬系統的研發能量與能力。建構部分，引進美國國家大氣研究中心的社群地球系統模式，建立長期氣候模擬的能力。解構部分，測試與評估該模式的氣候模擬能力，了解其優缺點。最後的重新建構，則依據國內特有的專長，針對該模式的對流與雲量、雲微物理與氣膠、地表輻射、海氣交互作用等模組，進行必要的修改，或以自行發展的模組取代，完成臺灣地球系統模式。

氣候變遷實驗室以臺灣地球系統模式進行長期氣候模擬，評估模擬多個氣候變數（如溫度、雨量、風場與大氣輻射等）長期平均場的整體表現，發現優於大多數模式，整體上也比原生模式CESM1表現好。再進一步比較氣候變化（如亞洲季風、季節內變化）也有明顯改善。這些分析結果證實，經過數年的努力，納入有臺灣研究特色的模組後完成的臺灣地球系統模式，不僅有其設計獨特之處，與國際著名氣候單位的模式相比，模擬氣候能力毫不遜色。

2. 高解析大氣模式 (HiRAM)

HiRAM是臺灣旅美科學家林先建博士研究團隊建立的高空間解析的全球大氣模式，其動力架構為六面體方塊地球網格有限體積法動力模組（FV3）是目前最進步的全球大氣模式動力模組之一。經過與多組大氣動力模組的嚴格評估比較後，FV3於2017年被美國國家環境預報中心採用，作為下一代全球天氣預報系統的骨幹。

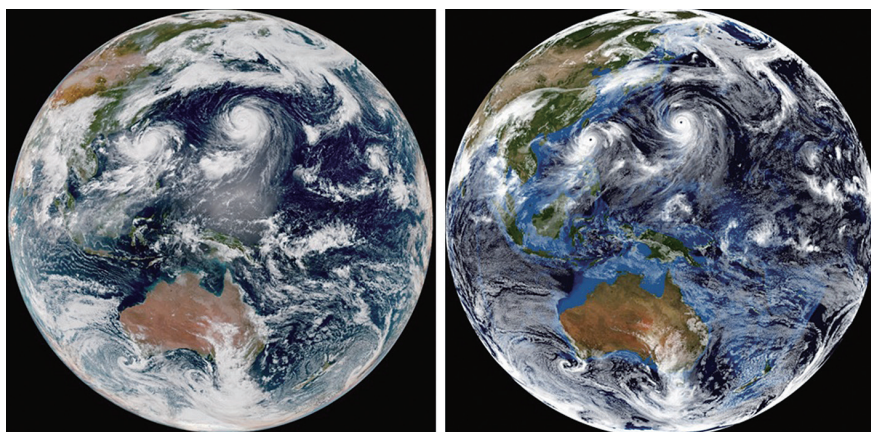
氣候變遷實驗室於2011年將HiRAM建置於國家網路與高速計算中心的御風者高速電腦，以25與50公里的高空間解析度，進行現今與未來氣候的長期模擬，推估在溫室氣體大幅增加的21世紀中與世紀末，全球天氣與氣候特性的變遷。高空間解析度HiRAM模擬天氣現象的能力極佳，不僅可以模擬鋒面特徵，亦可以模擬出颱風大略的結構與演變。氣候變遷實驗室以不同的未來海面水溫變遷型態，進行多組氣候變遷模擬。這項模擬所需計算資源十分龐大，在國網中心的大力支援下，方得以順利進行。研究團隊將模擬數據提供給國內學研界（如臺灣氣候變遷推估資訊平台）評估全球暖化對臺灣天氣與氣候的衝擊。

三、聯合國氣候變遷模擬

面對人為暖化的威脅，了解其是否已經對天氣與氣候造成明顯的影響以及未來的可能變遷，結合觀測與模擬診斷分析了解過去變遷，以及用模式推估未來變遷，是主要的國際氣候研究趨勢。為了整合全球研究能量，世界氣象組織轄下的世界氣候研究計畫在1995年啟動耦合模式比對計畫（Coupled Model Intercomparison Project, CMIP），整合全世界主要氣候研究中心的氣候模擬能量，遵循國際認定的模擬程序協定，以各自研發的氣候模式，有系統地進行氣候變遷模擬與推估。這些結果是IPCC撰寫歷次氣候變遷評估報告的主要科學依據。CMIP第六期計畫（CMIP6）已經啟動，為預計於2021年發布的第六次評估報告做準備。經過氣候變遷實驗室與國內同仁的努力，臺灣已經成為少數具有模擬與推估長期氣候變遷的國家之一。氣候變遷實驗室已經正式向CMIP6登記成為第32個參與團隊，將提供由國內團隊以TaiESM與HiRAM模擬的氣候變遷資料，協助推估全球暖化對地球生態環境與人類社會的可能衝擊。

四、在地化應用

臺灣地球系統模式與高解析大氣模式都是全球氣候模式，解析度分別約為100與25-50公里。前者考慮影響全球氣候的地球系統間的交互作用，後者則通常以前者提供的資訊，進一步模擬前者無法解析的更小尺度的天氣系統，如鋒面、颱風等，但仍無法準確模擬受臺灣地形影響的劇烈對流與豪雨，或熱島效應等。理想中的系統為前述的無接縫模擬系統，可以模擬從全球（數百公里）到區域（數百公尺）尺度，同時考慮全球暖化造成的大尺度變遷到對局部豪雨的影響（圖二）。但是，目前仍力有未逮。不僅模擬的科學瓶頸尚待突破，其所需的電腦計算資源也非目前peta級（ 10^{15} ，每秒千兆次運算）超級電腦能負荷。目前階段性研究方法，多是以全球模擬資料驅動數公里解析度的區域模式，模擬全球氣候變遷對小區域天氣與氣候，以及劇烈天氣現象的影響。國內也採取類似方法。氣候變遷實驗室將前述模式的模擬資料提供給國內學研界，以區域模式模擬在未來氣候暖化情境下，影響臺灣的颱風、豪雨、午後雷陣雨、乾旱、熱浪等現象將如何變遷。這些資訊再提供給各領域去評估對生態、農業、公共衛生、氣象相關自然災害、水資源，甚至都市與國土規劃的衝擊，再據之規畫因應未來氣候變遷應有的調適作為。



圖二：無接縫模擬與衛星觀測(02Z 21 August 2015)：(左)日本向日葵氣象衛星照片，(右)利用FV3為架構的天氣預報模式，以6.5公里空間解析度，模擬50小時之後的雲圖(courtesy of Linus Magnusson, ECMWF)。

五、無接縫模擬系統

臺灣地小人稠，山高水急，極端氣候、災害天氣，與空氣品質的模擬與預測難度極高，多年來未能有突破性進展。環境變遷研究中心氣候變遷實驗室下一階段將在目前的氣候模擬基礎上，以FV3為架構，發展跨空間與時間尺度且適用於臺灣的氣候變遷-劇烈天氣-空氣品質無接縫模擬系統，希望對臺灣未來的氣候、天氣甚至空氣汙染模擬與預測能有突破性的貢獻。

註：本文部分內容發表於《自然科學簡訊》第三十卷第一期（民國107年2月）。