

台灣氣候模擬系統—探索氣候的前世今生與來世

中央研究院環境變遷研究中心 許晃雄 李威良 許乾忠
 蔡宜君 杜佳穎 王懌琪
 台灣大學大氣科學系 陳正平

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，也必須能完善的模擬影響氣候系統（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作用，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「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。相對於世界上大多數地區，這項工作對台灣而言更加困難。這是因為台灣位處於歐亞大陸、太平洋與印度洋交界，深受變幻莫測的東亞/西北太平洋季風與颱風影響，而且因為幅員小且地形陡峭，劇烈天氣與豪大雨的預測極其困難。除了劇烈降雨事件，每隔幾年發生一次的乾旱，對台灣的水資

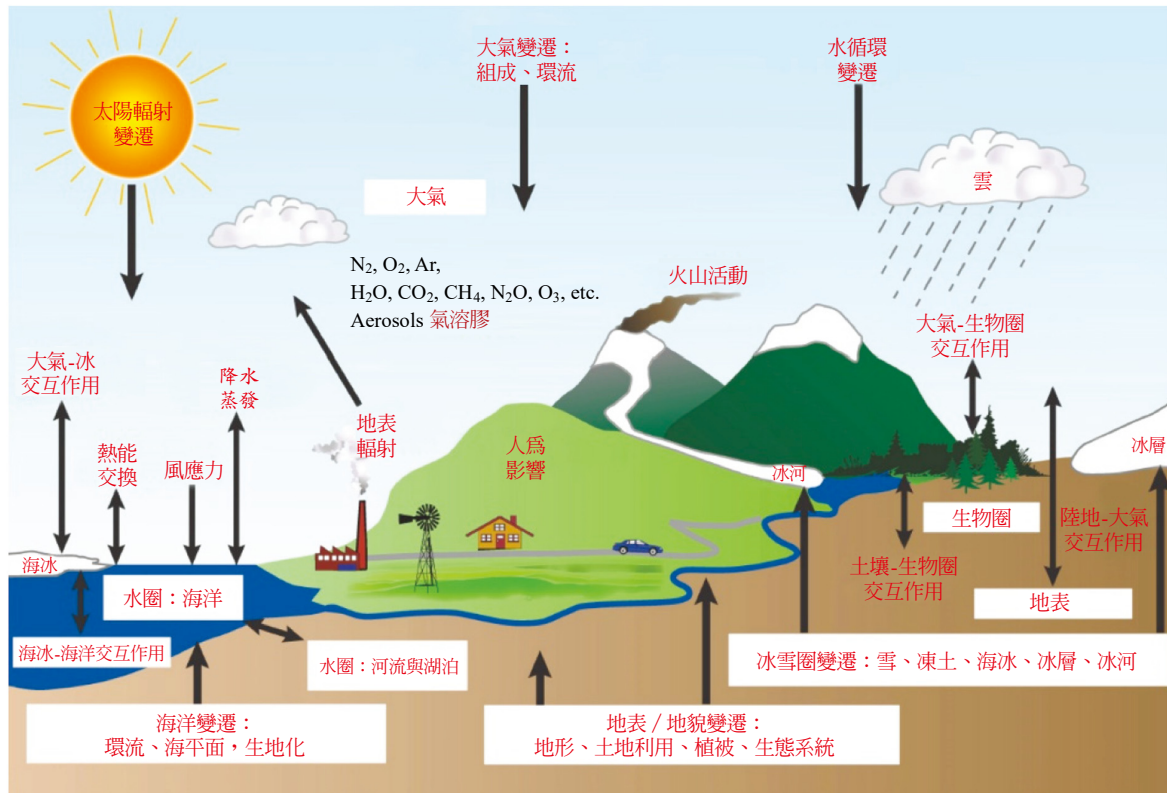
源也造成極大壓力。在全球暖化幾乎無可避免的情況下，吾人必須有能力推估極端天氣與氣候（豪大雨、颱風、寒潮、熱浪與乾旱等）的統計特性將有何改變，才能運用這些資訊評估氣候變遷對台灣生態環境、經濟社會與人民福祉的衝擊，並規畫/推動調適與減緩機制。

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，負責台灣氣候模擬系統之研發，建構台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、台灣極端天氣（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，評估氣候變遷對台灣生態環境、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、台灣氣候模擬系統的建構：強化能力、探索變化、推估未來

國內長期以來，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台灣氣候模擬系統：

1. **國內研究人力整合**：以中央研究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。
2. **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)與美國國家海洋暨大氣總署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



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）

內可以自行研發改進的社群氣候模式。

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

氣候變遷實驗室建構、解構與重新建構氣候模式，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、雲微物理、氣膠、輻射、地表過程、海洋等模組，進行必要的修改，或以自行發展的模組取代。

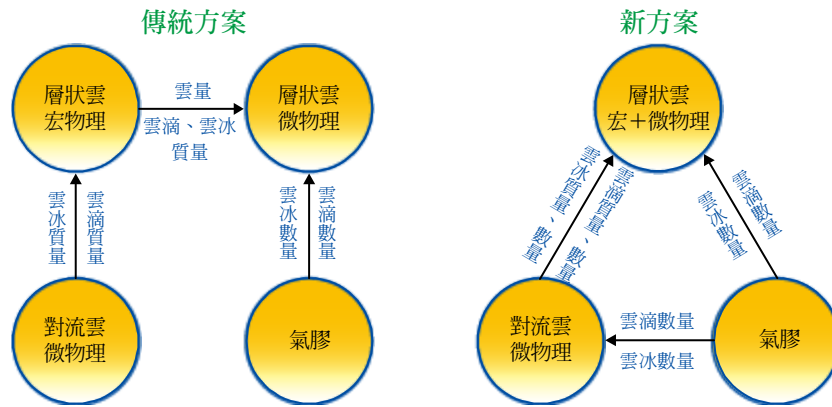
地球系統模式顧名思義包括大氣、海洋、陸地、冰雪、植被等氣候子系統，不僅模擬各子系統內的複雜物理與化學過程，且能模擬各子系統間的交互作用，以及人為或自然溫室氣體與氣膠排放對氣候的影響（圖一）。這類模式可以用來探索影響古今氣候變化的機制，也可用來推估人類持續排放過多溫室氣體可能導致的氣候變遷趨勢。後者也是聯合國氣候變遷跨政府專門委會

(IPCC)評估與撰寫歷次氣候變遷評估報告的主要依據。

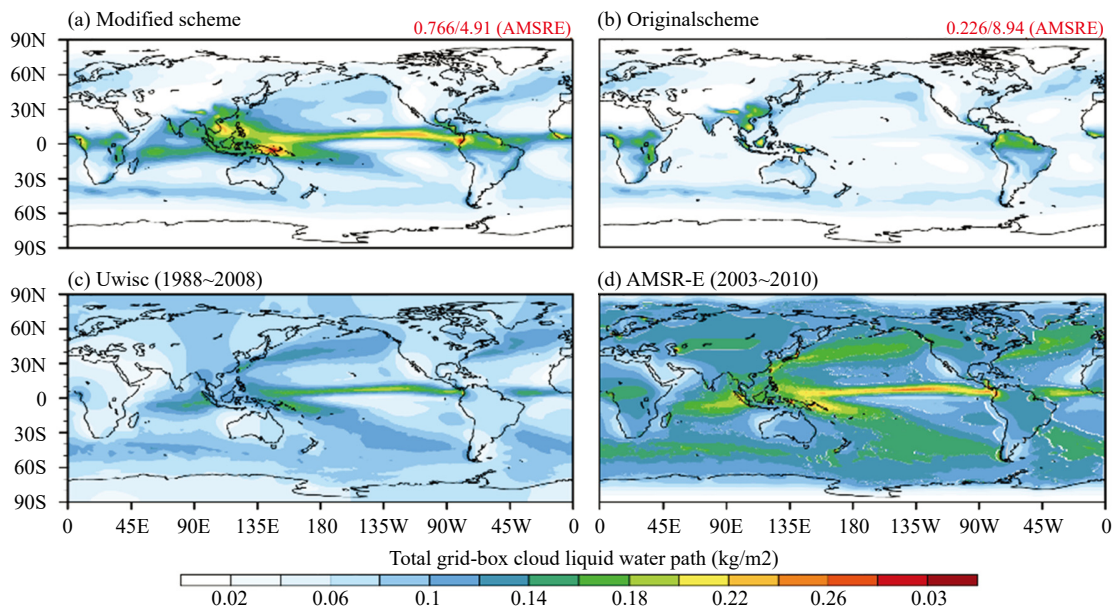
氣候變遷實驗室同仁偕同國內多位大氣模式專家學者，進行下列模式修改與發展。

(1)對流與雲量

氣候模式格點間距約為 100 公里，如何模擬一萬平方公里區域內的對流與雲量是氣候模式研發數十年來最大的挑戰之一。對流雲是大氣不穩定造成垂直運動而產生的雲系，也是驅動全球氣候系統最主要的能量來源之一，因此是模式中很重要的物理過程，但大部分的模式都無法準確模擬對流的觸發機制。TaiESM 獨特的觸發機制設計，改善了陸地降雨日變化的起迄時間（如午後或夜間降雨），並且改善綜觀天氣尺度的對流擾動模擬，且間接影響到更大尺度的對流系統與環流。目前氣候模式決定雲量多以簡單的相對濕度閾值作為判斷依據，與實際物理過程有極大差距。TaiESM 的雲宏觀物理參數法依據模式計算得到的水物含量與飽和度來決定雲量，顯著改善了全球雲量與其他氣候場的模擬。



圖二 全球模式中積雲參數法、雲宏觀物理與雲微物理參數法的連結。左圖為 NCAR CESM 原始處理流程，右圖為 TaiESM 的流程

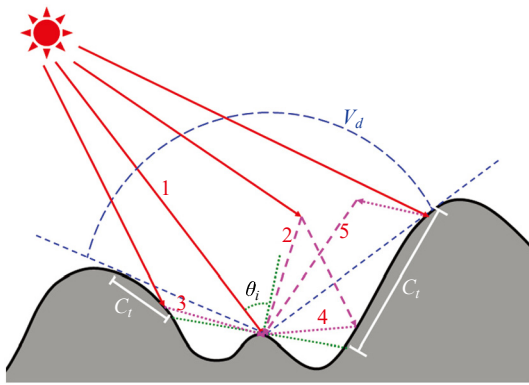


圖三 與衛星觀測比對，顯示 TaiESM 雲液態水厚度模擬的顯著改善：(a)與雲微物理耦合的對流雲參數法，(b)原對流雲參數法，(c) Uwisc 衛星觀測反演，與(d)AMSR-E 衛星觀測反演之平均雲液態水厚度

(2)雲與氣膠模組

雲與氣膠是全球模式中最難捉摸的物理現象。雲和氣膠粒子粒徑大約 0.01 至數個微米 (μm)，即使成長到雨滴或雹也不過數微米，但卻是地表能量收支不可或缺的存在，也是氣候研究不確定性的重要來源。如何改進模式對雲與氣膠的處理，是世界各國主要氣候模式研發中心的嚴峻挑戰，卻也是國內氣候模式研發的契機。台灣大學大氣科學系研究團隊多年來的研究，從基本的物理公式出發，盡量減少簡化與假設，保留重

要的物理量。研發出的模組相較於傳統的微物理參數法更為準確、詳盡，尤其是能考慮雲與氣膠交互作用，更是一大特色。國內自行研發的雲與氣膠模組(架構與概念請參見圖二)植入 TaiESM 後，大幅度地改進了氣膠-雲-降水交互作用的模擬能力(圖三)。這項突破讓國內自行研發的 TaiESM 擁有模擬氣膠-雲-降水-輻射-氣候間複雜交互作用的獨特能力，使之擠身世界先進地球系統模式之列。



圖四 太陽光在複雜地形的吸收、反射與再吸收過程的示意圖

(3)地表輻射

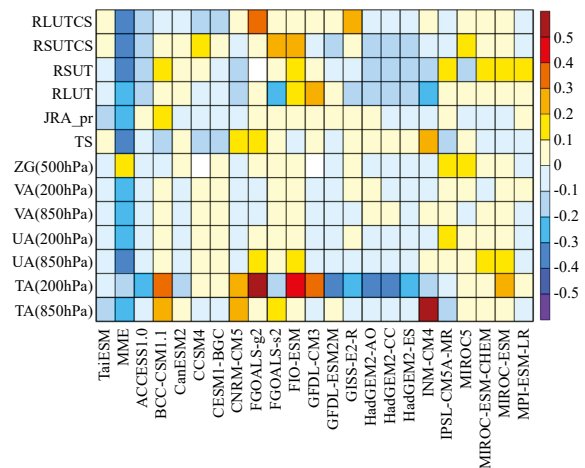
目前所有氣候模式計算地表太陽輻射量時，都將地表當成平面，不考慮山坡向陽面與陰影面吸收量的差異、高山對附近地面投射的陰影、以及地表間陽光的相互反射等（如圖四）。我們利用高解析度蒙地卡羅法發展了一套適用於氣候模式的參數法，能夠有效率地準確估計在複雜地形中陽光對地表的加熱率。TaiESM 是目前唯一有考慮這項物理過程的氣候模式。測試發現這項物理過程在複雜地形周遭有明顯的影響，如改善目前模式模擬青藏高原時地表偏冷的偏差，以及改變亞洲夏季季風的模擬特徵。

(4)海氣交互作用

海氣交互作用是影響氣候的重要機制，目前的地球系統模式多已具備模擬大尺度海洋大氣耦合現象（如聖嬰現象）的能力，但在模擬表層海洋與大氣交互作用仍有相當大瓶頸。國內發展的一維雪、冰、海洋模組以極高垂直解析度，可以清楚地模擬出海洋表層海水的日變化，且在與全球大氣模式耦合後，可以大幅改善熱帶季內振盪的模擬。該擾動現象對熱帶甚至全球的天氣與氣候的影響程度，僅次於聖嬰現象，但大部分氣候模式都無法恰當地模擬出應有的特徵，是世界氣象組織積極尋求突破的重點研究。國內經過耦合過後的大氣全球模式於 2016 年被評為模擬季內振盪表現最佳的八個模式之一。

(5) TaiESM 整體表現

氣候變遷實驗室以台灣地球系統模式進行

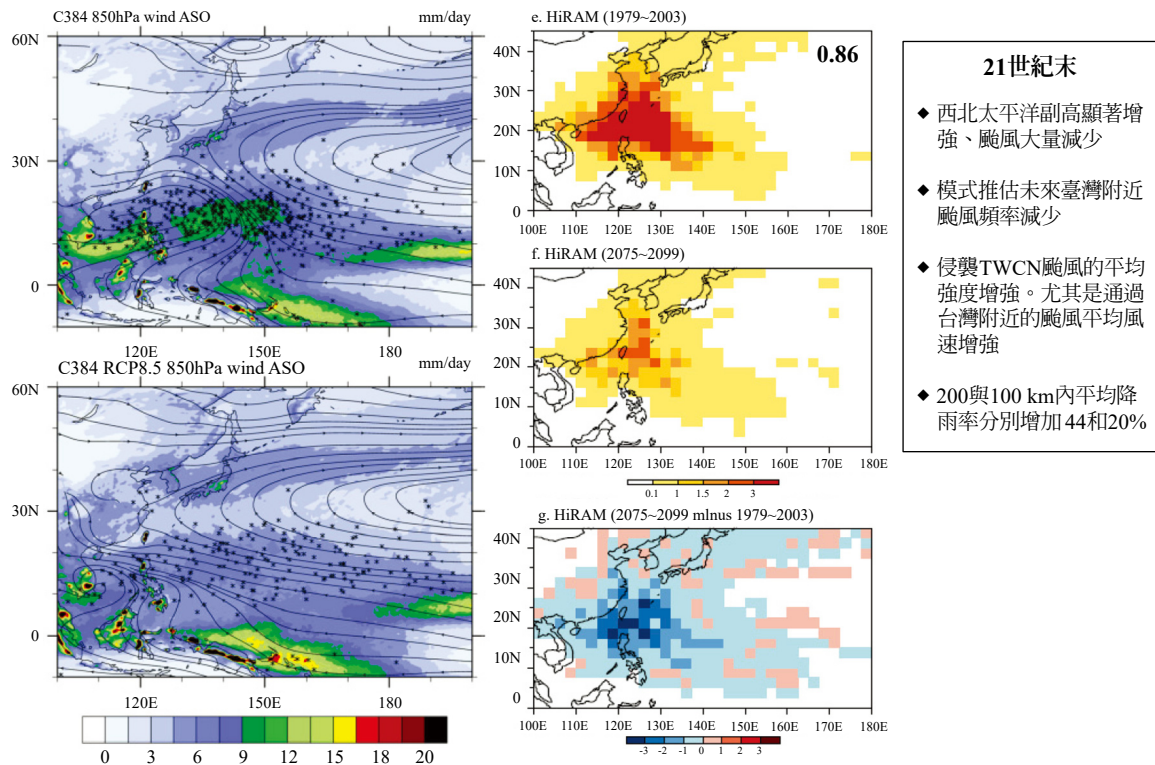


圖五 TaiESM 與世界各國氣模式在系統性誤差上的比較。藍色（紅色）表示相對表現較佳（差）。表現最好的是多模式系集平均 (MME)。TaiESM 的整體表現比大多數模式佳

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（圖五）。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，納入有台灣研究特色的模組後完成的台灣地球系統模式，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 是台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, Finite-Volume for Cubed Sphere)是目前最進步的全球大氣模式動力模組之一。FV3 透過投射如魔術方塊般的立方體網格到地球表面上，形成六面體方塊地球網格，所有網格排列近似垂直正交，並利用有限體積法（比有限差分法容易維持質量守恆）的運算特性，提供高運算效率與精度，以符合不同水平空間解析度的需求。FV3 於 2016 年經過與多組大氣動力模組的嚴格評估比較後，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。



圖六 以 HiRAM 模擬 1979-2003 年與 2075-2099 年西北太平洋的 (左) 850hPa 環流 (黑線)、雨量 (彩色陰影) 與熱帶氣旋生成 (黑點) 之變遷, (中) 侵台颱風頻率與路徑, 與 (右) 相關說明

氣候變遷實驗室於 2012 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 (如台灣氣候變遷推估資訊平台) 評估全球暖化對台灣天氣與氣候的衝擊。分析發現在溫室氣體大幅增加的情境下, 西北太平洋副熱帶高壓將比目前增強許多, 影響範圍大幅擴大, 夏秋季颱風數量可能因此減少約 40%; 侵台颱風因此將減少許多, 但是侵台颱風的平均風速與雨量將增加 20-40% (圖六)。亦即, 由於侵台次數大幅降低, 颱風對台灣整年雨量的貢獻明顯減少, 但侵台期間的強風與豪雨都可能顯著變強。此外, 秋冬季台灣附近鋒面活

躍度降低, 造成雨量減少, 春季乾旱發生頻率更加頻繁; 午後雷陣雨的變遷也類似, 即發生頻率明顯降低, 但強度增強。

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, 有系統地進行下列研究: 1) 比對模式模擬氣候能力, 據之改善模式; 2) 探討人為與自然因素對過去百年來氣候的相對影響, 以評估人為影響的程度; 3) 設定溫室氣體排放情境, 推估未來氣候變遷的可能趨勢, 判定其可信程度。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)

已經啓動，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，台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

台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台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。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，影響台灣的颱風、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。

科技部自 2010 年以來推動的多項氣候變遷研究，已經建立此一由全球到在地，基礎鏈結應用的研發能量。台灣氣候模擬系統的開發與能量建構，在此一鏈結中提供最上游的資訊，國內得以有系統地定量評估氣候變遷的可能衝擊與規畫應有的因應措施。此一能量與能力已經初步建立，希能持續加深加廣相關領域的研發，強化基礎與應用連結，對規劃台灣因應全球暖化衝擊的長期發展策略與落實相關措施，提供關鍵性的貢獻。