

《歐美研究》第四十七卷第一期（民國一〇六年三月），107-142  
© 中央研究院歐美研究所  
<http://euramerica.org>

## 氣候模擬模型的確證問題\*

趙相科

國立清華大學經濟系  
30013 新竹市光復路二段 101 號  
E-mail: [hkchao@mx.nthu.edu.tw](mailto:hkchao@mx.nthu.edu.tw)

邱獻儀

國立清華大學經濟系  
30013 新竹市光復路二段 101 號  
E-mail: [hsieni@mx.nthu.edu.tw](mailto:hsieni@mx.nthu.edu.tw)

### 摘要

模擬方法不僅是氣候變遷研究的主流研究方法，亦使用在估算氣候變遷對於經社效益影響的政策分析，故當代氣候研究

---

投稿日期：105.4.6；接受刊登日期：105.12.23；最後修訂日期：106.1.10  
責任校對：吳智偉、廖玉仙、胡貴鳳

\* 本論文之主題、討論重點和範圍、與論證架構由趙相科制訂，並指導邱獻儀進行文獻分析與初稿撰寫，最後由趙相科負責定稿。在審查階段的修改與完稿由趙相科完成。本文初稿曾在 2015 年於 DEMOCRASCI—the Value-Free Ideal in Economics Workshop (英國 Durham 大學)、與 2016 年於台灣科技與社會研究學會年會發表，感謝 Julian Reiss、Alison Wylie、林宗德、吳瑞媛、洪景山、陳瑞麟、章鶴群、蘇慧君等學者所提供的意見。本文蒙科技部優秀年輕學者專題研究計劃〈公共政策的科學哲學分析〉(102-2628-H-007-003-MY3) 下延攬博士後研究人才 (104-2811-H-007-005) 經費補助，並蒙 104 年度科技部與英國人文社會科學院 (British Academy) 國際合作人員交流計畫〈經濟學價值中立性的科學哲學分析〉補助赴 Durham 大學研習交流，特此致謝。

不但是模型化科學的代表，同時具體地表示模擬模型所在開放複雜體系的研究中所扮演的重要角色。換言之，除氣候模擬的討論可作為科學模型的案例，顯著地反映科學模型的相關重要科哲議題之外，並可展現科學家使用抽象的模型以探討不可控制的開放複雜體系的研究之方法論、知識論、至本體論層面的探討。本文以氣候模擬模型為例，說明傳統邏輯實證論的確證理論不敷科學實作之需，應重新檢視哲學的確證理論與科學模型所扮演的角色。

**關鍵詞：**氣候變遷、科學模型、氣候模擬模型、確證、不確定性

## 壹、前言

氣候變遷的議題在近幾十年來受到廣泛注意，特別是聯合國於 1988 年成立「政府間氣候變遷專門委員會」(Intergovernmental Panel on Climate Change; IPCC)、1992 年通過「聯合國氣候變遷綱要公約」(United Nations Framework Convention on Climate Change; UNFCCC) 之後，各國積極地致力解決氣候變遷問題。近期在巴黎舉行的 2015 年聯合國氣候峰會便通過歷史性協議，確立了在本世紀結束之前，全球均溫上升不超過攝氏 2 度，以致力遏止全球暖化的目標。即便是大眾對於全球暖化問題的認知受到許多政治與意識型態等「非科學」因素影響，<sup>1</sup> 全球性氣候政策的制定相當依賴氣候科學研究所提供的氣候變遷現象的描述與預測，而這些研究主要是以科學模型 (models；在大氣科學的用語稱之為「模式」) 作為分析工具。<sup>2</sup> 大氣科學模型化的過程始於二十世紀中期，在此之前的氣象學仍屬「觀察與歸納」的經驗科學，對氣候進行觀察與紀錄方式搜集資料，然後進行觀測資料的統整和分析。一九五〇年代，數學家 Jule Charney 與 John von Neumann 主導的普林斯頓大學研究團隊開始以電腦進行天氣和氣候的模擬研究，發展出以電腦模擬 (simulation) 研究大氣變化的數值分析法 (Dahan Dalmedico, 2007; Edwards, 2010)。如「氣候模式模擬」是先建立以數學方程式代表

---

<sup>1</sup> 如 Oreskes and Conway (2010) 相當著名的著作中所描述之美國的情況。另見 Jacques, Dunlap, and Freeman (2008) 所論保守派智庫與否定全球暖化現象的出版品之關聯。

<sup>2</sup> 在國內科學哲學的用語中 model 通常譯為「模型」，然大氣科學界譯為「模式」。本文除在使用大氣科學專有名詞時採取國內學界譯法以「模式」稱之外，其餘仍以「模型」表示之。

相關物理、動力、化學等科學定律的數理模型，繼之運用既有資料設定參數值後使用電腦運算，模擬未來氣候狀況（蔡清彥、柯文雄、許武榮，1990；Ahrens, 2009）。隨著計算速度的大幅躍進，使得早期因技術限制而偏向區域性的研究，轉為全球性的大氣研究與氣候變遷分析。

模擬方法不僅成為當今氣候變遷研究的主流研究方法，亦使用在估算氣候變遷對於經濟效益影響的政策分析（如英國政府 2006 年公布的《史登報告》[Stern Review]）。故在科學哲學的研究中，當代氣候研究與經濟學等學科不但被視為模型化科學的代表，同時具體體現了模擬模型所擔任的重要分析工具角色。同時，大氣環境與經濟市場皆為開放的複雜體系，除與實驗室的封閉環境大相逕庭、不具人為控制性之外，兩者之複雜程度更非為現在人類知識所能通盤了解。換言之，以科學哲學的角度觀之，除氣候模擬的討論可作為科學模型的案例，顯著地反映科學模型的相關重要科哲議題之外，<sup>3</sup> 並可展現科學家使用抽象的模型以探討不可控制的開放複雜體系的方法論、知識論、至本體論層面的探討。

本文結構如下：第二節介紹大氣科學的發展與氣候模擬模型的特性，第三節指出氣候模擬模型研究不確定性的來源，第四、五節由科學哲學學者歐蕾斯柯斯（Naomi Oreskes）、洛依德（Elisabeth A.

---

<sup>3</sup> 科學模型已是科學哲學的主要議題，最近的西方科學哲學教科書皆有顯著篇幅的討論。中文讀者可由陳瑞麟（2010）的教科書的紹介著手。就科學模擬而言，近來科學哲學文獻中已對其哲學意義有多層面的探討，如 Frigg and Reiss（2009）、Giere（2009）、Morrison（2009）、Winsberg（1999, 2003, 2009, 2015）在科學模型脈絡下的討論，Edwards（1999, 2010）、Lenhard and Winsberg（2010）、Lloyd（2009, 2010）、Parker（2008, 2009, 2010），關於氣候模擬的哲學探討，和 Morgan（2003）關於經濟學模擬分析的個案分析。

Lloyd) 與帕克 (Wendy Parker) 等人對氣候模擬模型的討論出發，說明模擬模型的確證問題，並於第五節以氣候模擬模型為例，探討若將模型視為一種「啟發工具」可達到使用者的某一特定目的作為合理的評價標準，第六節結論。

## 貳、大氣科學的發展與氣候模擬模型

現今因研究主題不同，大氣科學可粗分為三個研究領域：(1) 研究大氣物理特性及其變化原則的大氣物理學 (atmospheric physics)；(2) 研究天氣現象及其演變過程的氣象學 (meteorology)；以及 (3) 研究氣候形成機制、分佈和變遷的氣候學 (climatology) (陳正改, 1995)。大氣變化的基本原理和理論是大氣物理學的研究核心；氣象學偏向短期、區域性的天氣 (weather) 研究與預測；氣候學則專注長期氣候變化的趨勢與規律。這三者密切地關聯在一起，形構了我們對地球大氣變化的瞭解與知識。雖然天氣和氣候的指稱有所區別，然而兩者卻是密切相關的，因為要瞭解短期天氣如何變化，不能不考慮長期氣候的規律性影響。反之，要瞭解長期氣候的變化趨勢，也不得不考慮非規律性的影響因素。因此天氣與氣候可視為對同一現象的不同描述，而非完全不同或不相干的現象，它們也一起構成了地球未來的大氣變化趨勢與現象。而要完整地瞭解天氣與氣候的變化，科學家利用基於相關的大氣理論建構出來的「氣候模型」(climate models) 或「天氣模型」(weather models) 作為理解地球大氣變化的認知工具。這兩種模型的模擬對象可能因為研究目的而有所區別，然而其基本原理與運作方式，原則上是相似的。以下我們簡略介紹這兩種模型，並進一步闡述大氣研究中所使用的模型之結構與操作方法。

## 一、短期氣候的模擬：天氣數值預報

針對短期天氣變化的研究和預測，首要考量是如何在最短時間內獲得最精準的預測結果。在還沒有電腦模擬技術的時代，要知道未來天氣狀態的主要方法是針對所收集到的觀測資訊進行天氣圖繪製，<sup>4</sup> 再按照大氣物理原則和過往經驗進行天氣圖分析。<sup>5</sup> 這種方法也被稱為「主觀預報」，因為預報者的個人判斷是該法的主要依據。電腦模擬技術純熟之後，該法也被引入用來進行短期氣象預測。如前所述，模擬方法是利用大氣會按照相關物理定律進行運動的假設，採用了適當的天氣方程式組，再利用電腦的快速計算特性，將觀測到的氣象資料輸入進行計算而達到天氣預報目的，此方法稱為「數值天氣預報」(numerical weather prediction)，主要運算模型為「大氣環流模式」(General Circulation Model; GCM)。相對於傳統的主觀預報，數值天氣預報被認為是具有理論依據、不含主觀因素的研究方法，再加上計算時間短等優點，已成為目前短期天氣預報的主流方法 (陳正改, 1995: 193-195)。由於天氣預報需求多為區域性，需要迅速並準確獲得近期天氣狀態的結果來符合社會需求，太複雜的模擬不僅增加運算時間，也不必然比簡化的模型有更好的預測結果，因此一般區域性天氣預報模型會選擇符合現有電腦硬體設備、且相對簡易的大氣模型進行預報工作。換言之，在氣象預測的科學實作中，會將模擬重點放在造成氣象變化的大氣活動而忽略其他相關但影響不顯著的因素，如洋流變化、溫室效應等因素。

---

<sup>4</sup> 大氣資料的收集包含了目測天空狀況、風向風速、能見度、氣溫露點、海平面氣壓、氣壓趨勢、降水量、雲狀雲高、氣溫、濕度、氣壓。這些資料的收集又包含了地面觀測與高空觀測等不同高度的資料收集 (陳正改, 1995)。

<sup>5</sup> 大氣物理原則主要是依據 1918 年挪威氣象學家 J. Bjerknes 所提出的挪威氣旋模型 (Norwegian cyclone model) 鋒面學說 (Ahrens, 2009)。

## 二、長期氣候模擬：多種環流模式

近幾年來獲得科學家、政治家與一般大眾注意的全球暖化和氣候變遷的議題，屬於長期氣候變化趨勢的現象。地球氣候的變化非常複雜，牽涉到許多不同類型的因素，因此僅僅考慮地球大氣環流本身的性質與變化結構尚嫌不足，還需要將太陽輻射、海洋、冰雪圈、陸地表面以及生物圈的分佈、性質與結構等因素的影響納入考量。<sup>6</sup> 短期天氣情況的變化雖然也會與洋流、海陸分佈、輻射量等因素相關，但相較來說影響較小而被忽略。因此在進行長期氣候的研究與預測時，除了數值天氣預報中會用到的「大氣環流模式」外，通常會再加上個別的環流模式，如「海洋環流模式」、「海冰模式」、「陸地增散模式」等，以進行相關的研究和計算。

在此我們可以看到短期天氣模擬與長期氣候模擬的差異。用於短期氣候的氣候模型著眼於計算的效率與成本，因此通常採用相對簡易的模型，如中央氣象局採用的全球預報系統 (Global Forecast System; GFS) (葉天降等，2012)。<sup>7</sup> 其次，由於短期天氣的預測需求多於當地特定區域的預測，而影響小範圍區域的天氣演變跟掌握該區域之大氣氣壓之高低變化、鋒面性質、當地地形、該特定時段的水汽 (雲) 分佈、氣溶膠 (aerosol) 的型態與多寡等因素較相關，<sup>8</sup>

---

<sup>6</sup> 太陽輻射的多寡主要與太陽本身的能量變化有關，但太陽黑子、地球公轉變換、地軸傾斜角度、地球軌道偏心率變化等因素也會造成很大的影響；冰雪圈主要指南北極的冰層變化；陸地表面包含山脈、岩石、湖、河、地下水等；生物圈則包含了在大氣、陸地和海洋中生存的動植物之活動，包含人類本身 (陳正改，1995: 203-205, 250)。

<sup>7</sup> 近來因為電腦硬體的發展越發成熟，提高了計算的效率，因而用於短期預測的氣候模型也越來越複雜。譬如兩週內的預報就會納入海溫變化的模型才會比較準確。

<sup>8</sup> 指那些懸浮在大氣中的各種固體雜質 (如塵埃) 和液體微粒 (如水汽變成的水滴和冰晶)，也稱為氣溶膠粒子、氣膠、煙物質。氣溶膠是水汽凝結的核心，對雲、雨的形成有重要作用，因此是預測天氣時的重要變數 (陳正改，1995: 5)。

所以會採用與上述因子相關的模擬模型。長期氣候模擬關切的是長期性的平均天氣狀況，如未來 10 年或 50 年的氣溫趨勢，因此相較來說較無計算時間上的壓力，加以影響長期氣候變化的因素更多、因素之間的交互關係也變得更複雜，因而需要長時間對大氣狀態、以及其他相關現象的觀測與紀錄，這些都增加電腦運算的負擔，因而也無法在數天、甚至數月內獲得結果。再者，由於長期氣候的平均情況較少關切特定區域在特定時間的變化，因而可忽略那些造成氣象現象的雲雨狀況等短期天氣變數，而多著重在海、冰、總體輻射量的增減、生物圈的變化等影響長期氣候變化的因素。

從上述說明我們亦可注意到，氣候模型基本上是根據研究目的來整合不同模組 (module) 以進行天氣或氣候的模擬。具體地來說，大氣有大氣環流模型、海洋有海洋環流模型，而諸如氣溶膠、氣溫、水汽等因素都有其相應的模擬模型。不同研究團隊會根據研究或預測的需求、地區性的差異、硬體設備等現實因素將不同的模擬模型進行不同模型之間的組合和橋接，形成相對全面或限縮的氣候模型 (Dahan Dalmedico, 2007)。

### 三、氣象模擬之結構與操作

氣象學最重要的是對狀態轉變動態過程的模擬。要掌握從開始到結束的一連串變化狀態，模擬模型本身必須掌握模擬對象背後的變化原理，才能實現對象變化的模擬。因此模型的構成，最主要是表徵氣象結構與變化原則的數學方程式。模型從設定模擬特定區域的原初狀態的「初始狀態」或「初始條件」(initial conditions) 開始，按照模型方程式的設定依時間進行計算。同時模擬的過程須將物理定律數學化，組成模型的基本物理定律，理想上應該能以數學模型反映物理的結構。然而建立在物理定律之上的複雜數學模型加上不



完整的實證資料，常無法得出明確的數值解，因此為了電腦計算上的方便性與順利完成計算，構成模型的方程式僅能追求「趨近解」。

模擬模型的另一個重要過程是參數化 (parameterization)。簡言之，參數化是利用已觀測到的變數數值去推估未觀測到的變數數值。舉例來說，為了獲得未來天氣的變化狀態，氣候模型會將進行大氣環流的區域切割成等面積的網格 (grid) 來進行計算。<sup>9</sup> 但是此舉不易分析小於網格的氣候變化過程，故在模擬中需要利用較大尺度資料去推估小於網格氣候變化之狀況，亦即是參數化過程的數值計算。又如網格中的雲量與濕度這兩種資料要如何關聯起來是模擬模型必需要處理的重要問題。我們或許會認為這兩種資料的關聯要依賴於相關氣候理論，進而透過數學方程式來模擬這兩種元素的互動。然而即便我們已經有了雲量與濕度之關係的理論，但由於兩者太過複雜導致數學計算上的問題，或是因硬體設備不足而無法進行有效的數學計算。一個可能的方式是基於我們知道雲量與濕度之間有共變關係，因而進行將兩者做平行連結的參數化。參數化過程對於氣候模擬來說是非常關鍵的一環，它可能是基於已知知識、未知的假設、或是受限於使用之電腦計算技術和設備等級等條件，而在數值計算理論的基礎上進行如找尋合適地連接方程式的方法、對觀測資料進行截斷、精簡程度的取捨等分析活動，才可能完成模型的參數化過程，讓模型可以順利地進行模擬計算。

據此，氣象學中的模型模擬過程可以簡述如下：首先從大氣的觀測資料之收集和整理開始，然後將這些不同資料進行分析後獲得初始資料、接著將不同層級的資料分別輸入模型中的不同模組之相

---

<sup>9</sup> 由於地球是圓的，但天氣圖為二維度的平面，因此為了進行網格計算，就需要進行地圖投影的步驟，將地表投影攤開轉為平面。氣象地圖通成使用保角投影，達到盡量避免形狀和角度變形嚴重的問題 (蔡清彥等，1990: 11-12)。

關變數欄位、進行參數化程序，讓電腦按照模型的結構和程序計算這些初始狀態隨時間變化的結果，以作為對未來氣候變遷的預測。故初始狀態的建立、模型的組成與參數化過程對模擬結果有決定性之影響，特別是他們是建構模擬模型過程中造成著不同類型的「不確定性」的重要因素。因不確定性的存在，使得模擬結果與實際現象有誤差，導致對氣候模型的質疑 (Maslin & Austin, 2012; Parker, 2010, 2011)。

## 參、模擬模型的不確定性

氣候模型的不確定性可區分為三類共七種，其中包含與模型實作有直接關係的模型結構與資料的不確定性，和與模型本身無直接關係的偶然外在條件之不確定性。在這三類下的七種不確定性分別是：建構模型時的 (1) 建構模型方程式之氣候理論的不完備性、(2) 模型選擇的不確定性、(3) 參數化過程的不確定性；資料的不確定性則包含了 (4) 有限觀察資料、(5) 資料與理論背負、(6) 初始條件的選擇、最後則是 (7) 氣候環境結構的不確定性。以下就各點分述之，並說明學者對於不確定性之處理方法。

### 一、氣候理論的不完備

大氣運動與變化的原理原則上依賴於物理學的研究成果；而將這些原理應用到氣候現象上則歸功於數學與電腦技術，因此氣候科學可視為是結合物理學、數學和電腦科學的應用科學 (Lloyd, 2009)。然而要精確掌握天氣與氣候的變化，仍需要實際的氣候知識，如對冰河期規律的掌握、雲、雨、海、冰之間的關係研究。然

而科學家對於氣候變化之規律本性的掌握還不是非常充分，<sup>10</sup> 這影響並侷限了模型本身的建構，進一步影響方程式的參數設定、以及不同參數之關係結構的想像。這種不確定性明顯地無法透過模擬本身的數學調校、或是提高觀察資料的精準性和涵蓋度來改善。

## 二、模型選擇的不確定性

目前全世界的大氣或氣候研究中心分所使用的模擬模型約有數十個，但即便是相同的模型為不同地區所使用也會因地制宜而有在地化的差異。因不同的氣象模型都可用來模擬同一地區和時間的演變，並且模擬結果有很大的差距，這也就產生了模型選擇的不確定性問題：面對同樣的模擬對象，我們應該選擇哪一個氣候模型來進行模擬？一般而言應選擇最能獲得準確結果的模型，然而實際上很少有決定性的證據來確定哪個模型比較可靠。如文獻指出，當挑選 IPCC 報告中的七個氣候模型來模擬亞洲季風的季節和年際變化後，發現模擬結果的差異度甚大；若區分成南亞、東亞和西北太平洋三區分別模擬季風，則此七個模型對南亞的模擬結果較吻合觀測數據，對西北太平洋的模擬最差。不過模擬結果與實際觀測比較後可發現大多數模型對風的模擬結果都比雨量模擬表現來得好（卓盈旻、盧孟明，2009）。

## 三、參數化的不確定性

如前文所提，氣候的模擬模型通常必須將處理不同對象之方程式中的參數以特定方式關聯起來，以利電腦進行計算。參數化的困

---

<sup>10</sup> 譬如臺灣大學張智北教授與夏威夷大學王斌教授都曾於 2015 中央氣象局「天地人學思論壇」公開表示此看法。兩人根據他們的研究領域分別推測出自然因素的不確定，導致氣候或氣象模型的建構有缺失。另參見 Chang et al. (2014)。

難來自不同測量尺度的轉換 (Oreskes, Shrader-Frechette, & Belitz, 1994)。以前面提到的濕度與雲量的關係來說，雖然已知雲和濕度的關係非常關鍵，然而兩者的尺度差異還不算大，因此可以平行連結的方式處理。但是有些方程式的單位尺度差異非常巨大、甚或無法確知兩變數之間的關係時，參數設定就變得非常不確定。這樣的不確定性也會擴大到看似合理的參數設定上，雖然認知差異不大，但其模擬結果將會非常不同。因此即便參數化的不確定性可透過其它領域的研究來降低，其不確定性程度還是很高。不管不同變數之間的參數化關係為何，模型的使用者都必須面對一個問題：哪種關聯方式是最適合的？選擇不同參數化方式，除了代表了不同的結構關係外，也連帶會影響到模擬結果，因而構成方法論上的難題。

#### 四、有限觀察資料

氣象研究者必須透過原始觀測資料對研究主題或目標進行分析以了解已發生的情境，因此觀測資料的正確性扮演著關鍵的角色。然而縱然目前科技已使我們可獲得的觀測資料比過去來的多且準確，我們仍然無法完全地觀察到天候的全貌。故在計算模擬的實作上將大氣所在空間虛擬地切割成固定的網格大小來進行相關的演變推算，但實際上觀測者或觀測站不大可能都正好在模擬網格所在的點上。譬如不同高度的大氣狀態對於預知天候變化是非常重要的資訊，目前獲取相關資訊的方法是透過全球氣候中心在同一時間同時施放觀測氣球的方式來進行。在陸地上的氣球施放相對容易，但是海上的氣球施放就有非常高的難度，因而我們就必須透過推測的方式來獲取那些無法施放觀測氣球之地點的天候資訊。<sup>11</sup> 由於輸

---

<sup>11</sup> 蒙中央氣象局洪景山博士告知作者此資訊，特此致謝。

入氣候模型的數據是有限的，故建模 (model building) 的過程勢必須因可得觀測資料做調整。

## 五、理論負載

除了觀測資料不齊全的問題外，某些觀測站也可能因為各種可能的原因，如機械故障，不良環境等，而無法正確反應當時的數據資料。這些實際操作上的問題使得模型操作者必須對獲得的觀察資料進行除錯，將異常或不合理的資料剔除、並透過已取得的天候資料對無法取得之資料根據特定的方法來推出合理數值之後，再將這些處理過的資料送輸入電腦進行計算模擬。在電腦科技尚不發達時通常由人工判斷來進行此工作，目前則多由特定的電腦方程式代勞，稱之為資料同化 (data assimilation) 技術。操作模型者要如何進行資料同化也有許多不同方法，但由於資料同化是由主事者決定依照某一特定理論的原則進行，故資料同化的過程包含了操作同化程序者的主觀判斷，因此有觀察資料為理論負載 (theory laden) 的性質，有不具完全客觀性之慮。

## 六、初始條件的不確定性

數值天氣預報系統中存在著非線性過程，在設定作為第零期初始狀況時，初始的細微不同可能會在多期模擬後造成顯著的差異。初始條件的不確定性同樣源自研究者對於實際複雜氣候現象的不完全資訊，同時與研究者所決定的研究方法相關，如是要選擇輸入尚未被處理過的原始資料、抑或是要選擇同化技術處理過的資料。

## 七、環境條件的不確定性

氣候模型的模擬無法將突發的因素納入系統中來處理，譬如未

來碳排放量會以什麼方式增加或減少、何時會有火山爆發，產生蒸氣和灰塵而影響天氣和氣候、或者像是海洋上突然形成的颶風或颱風也會影響氣候變化。由於這些偶然因素不是構成大氣變化的常規性原因，因此就無法對這些額外條件進行表徵和模擬。因此當影響氣候或氣象的偶然因素出現時，也就會造成模擬結果的不確定性。

## 八、系集預報方法

面對觀察資料與模型本身的不確定性問題，模型模擬發展出「系集」(ensemble) 研究方法來因應。如上所述，由於目前用來模擬大氣系統的模型有數十個不同選擇，並且由於相關理論尚未發展完全、以及前述的不確定性問題，研究者很難判定哪個模型比較接近實際的大氣系統之運作。

一個解決之道是不單只依賴一個特定的模型和單一資料，而發展出系集預報方法 (ensemble climate prediction)。簡言之，系集預報方法包含了用同一初始條件來進行每一個可用的模型模擬、或是同一模型執行不同初始條件的方式來進行模擬。前者稱為多模型系集 (multimodel ensemble) 研究、後者稱為擾動物理系集 (perturbed physics ensemble) 研究。

多模型系集研究採取具有不同方程式的模型來進行對未來氣候變化的預估，通常這種方法必須仰賴目前世界上不同研究中心之團隊的參與，這是在資源有限，以及各團隊擅長或擁有之模型不同的情況下所發展出來的策略。

以全球是否暖化的模擬為例，每一團隊的超級電腦會根據被遞交的情境以及相關數值來進行模擬。各團隊所得到的模擬會被送給專業的團隊進行綜合性的分析和評估。擾動物理系集研究使用單一模型的多種版本模擬。在此方法中最合適的參數仍假設是不確定

的，因此模型會保持方程式結構不變，但將可得的不同數值都輸入該模型進行模擬。近來同化技術偏向以數學化的方式獲得「客觀的」物理參數，但之後仍需以專家依其經驗來判斷分析後獲得預測結果。<sup>12</sup>

## 肆、模擬模型的確證

在過去的科學哲學研究中，科學理論是最主要的討論對象，代表性學說如邏輯實證論者視模型為由科學理論所推導出的一種「對應原則」(correspondence rules)，故模型的確證亦附屬在理論之下，如當經驗資料與理論陳述不符之時，模型也一併被拒絕。但在科學實作中模型扮演獨立亦積極的多元角色，除語意觀點 (semantic view) 認為可以通過以一組相同結構的模型集合來定義 (van Fraassen, 1980)、或解釋 (Giere, 1988) 科學理論，更多基於科學實作的當代模型論者認為模型是獨立的個體 (autonomous agent)，其在建構之始便非依附於理論 (如理論模型) 或經驗資料 (如經驗模型)。模型也是一種媒介 (mediator) 工具，不僅是理論與真實世界的媒介工具，而且在科學研究過程中融合各種研究活動，使研究者可以從建模的過程中得到科學知識，強調模型自有的知識力，故傳統的科學哲學圍繞在科學理論的討論，如與發現和證成的脈絡 (contexts of discovery and justification) 的相關議題，皆需在基於科學實作的基礎上重新檢視模型在其中所扮演的角色 (Morgan & Morrison, 1999)，氣候模擬模型亦不例外。

但模擬模型的獨特之處在於以數據計算的方式「重建」(reproduce) 所欲研究的對象 (Edwards, 1999)，故模型與理論的關

---

<sup>12</sup> 參見 Parker (2011) 所指出氣候模型分析過程中專家意見的重要性。

係不在於以經驗數據來「檢定」理論，而更似將理論知識「應用」於模型以模擬現象 (Winsberg, 1999)。同時就氣候變遷議題而言，問題在於特定的氣候模型，基於存在前文所列舉之各項不確定性的前提之下，其所模擬得出的氣候變遷狀況是否與真實現象相符，故科學探究的主體為模型本身。因此在檢證氣候變遷時，不同於邏輯實證論所主張的假設—演繹式 (hypothetico-deductive) 確證理論 (confirmation theory) 所主張之證據 (E) 與理論 (T) 所推導得出的假說 (H) 的經驗支持的關係，氣候變遷的假說是透過模擬模型建構得出。因此異於邏輯實證論的  $E-H-T$  的確證關係，氣候模擬研究表示對模擬模型 (M) 的  $E-H-M$  的確證關係。

特別是模擬模型的組成已包含了實際資料的因素，使得奠基於理論與觀察陳述完全區分的假設—演繹式確證理論不適用於此實作。早期討論氣候模擬模型的科學哲學文獻，如 Edward (1999)，具體指出由於在參數化的過程中以實證統計資料設定模型參數而使模擬模型具有「資料負載」(data-laden) 的特性。氣候資料負載模型並非特例，鮑曼 (Marcel Boumans) (1999) 也同樣觀察到經濟學模型包含了資料因素，將此種模型的證成稱為「內建的證成」(built-in justification)，表示該部分已為證據所支持。由此而論，不論科學模型是具有資料負載或內建的證成特性，皆表示在科學實作中模型內部已包含證據的關聯性 (evidence relevance)。故舊的確證理論未臻完善，科學界與哲學界需嶄新的確證理論加以詮釋。換言之，模擬模型的假說建構具體地表現模型做為分析媒介工具的主體性，並提供重新檢視哲學學說的實作基礎。同時，科學哲學家們對於氣候模擬模型的討論提供對氣候變遷研究的反思，充分表現科學與哲學在彼此交互反思的過程中互相增長的歷程。確切而言，由於模擬模型的特性與其建模過程中各項不確定性的存在，故我們應以



模型為主體，重新思考證成的方法論。

在此脈絡下，科學哲學研究者對於氣候模擬模型的本質與其確證有不同的論述，氣候變遷領域權威科學哲學家歐蕾斯柯斯自1990年代始便已出版一系列關於氣候模型的哲學討論（如 Oreskes, 1998, 2010; Oreskes & Belitz, 2001; Oreskes, Shrader-Frechette, & Belitz, 1994），特別是歐蕾斯柯斯等（Oreskes et al., 1994）明確主張在檢視氣候模型時應需將確證性（confirmation）、有效性（validation）與檢證性（verification）分開。以下的說明將由歐蕾斯柯斯的論點出發，並對兩位科學哲學家洛依德與帕克的相關著作（Lloyd, 2009; Parker, 2009）加以分析，以探討科學哲學文獻中對於氣候模擬模型確證議題的討論，並對其所呈現的科學模型的知識論、實在論、與方法論意義加以說明與評論。

歐蕾斯柯斯對於氣候模型的驗證抱持極端否定的態度。以歐蕾斯柯斯等（Oreskes et al., 1994: 642）的論點觀之，我們可以認為因為模型所包含的眾多不確定因素使得實際觀測永遠無法完全驗證模型的真值。該文依序駁斥各種不同的哲學與科學上所使用的驗證概念。首先「檢證」（verification）指真理的斷言或確定，因此檢證一模型即是確定該模型的真值。但僅當一體系是封閉的才可能確定一命題的真假。這是因為封閉體系中的項目才可能被完整定義，以確保在系統中的相關邏輯推論之有效性，如形式邏輯、數學都是典型的封閉系統。換言之，他們認為檢證性必須建立在系統模型中的所有構成元素是獨立且正確的才可能達到，但是大氣環境為一開放體系，故無法模擬模型的真值。除了本文前述所指出的不確定性之外，歐蕾斯柯斯等人並提出建模過程中輔助假設的問題。他們認為在建模的過程中常需設置額外的輔助假設，但錯誤的輔助假設所產生的誤差有可能因互相抵銷之故而無法察覺，換言之，當一個模擬

模型的模擬結果符合資料時，並不能就此推論該模型是真實的。若是以經驗資料的符合性來論定模擬模型之檢證，自然會有不足決定 (underdetermination) 之慮。科學家有時以數值解與分析解是否相符之「數值檢證性」(verification of numerical solutions) 作為判準，但既然兩者皆僅在於特定條件與設定成立，故兩者之相符既不能證明數值解反映了其他條件設定的分析解，更不能證明數值解反映了真實世界，充其量僅是一種「基準化」的作為 (bench-marking)，表示與未知絕對值的標準相較的分析方式。

其次，若以「有效性」(validation) 作為驗證，則明顯地僅能表示模型體系的一致性 (consistency)，在此歐蕾斯柯斯等 (Oreskes et al., 1994: 643) 對於有效性的看法等同於方法論中的內部有效性 (internal validity)，而學界已廣泛認為內部有效性僅能作為推論合理性的判準，不能保證對外部真實世界的表徵能力。此外，他們認為有些模型包含「調校」(calibration) 的過程，在此所表示的氣候模型調校的意義與經濟學中的意義相似，皆為以設定不同的參數值使得理論與實際資料趨於一致。歐蕾斯柯斯指出這是學者所建議的兩階段驗證過程，首先做模型調校，再驗證模型結果。但他們認為這種方式同樣地會因開放體系與不確定性之故而缺乏驗證性。同時，因模型調教是設定不同的參數值去符合經驗資料，等於是強迫模型結果與真實世界相符，故歐蕾斯柯斯等人借用范弗拉森 (Bastiaan Cornelis van Fraassen) (1980) 的「經驗適切」一詞，表示模型調教僅能得到「被迫的經驗適切」(forced empirical adequacy)，而非檢測真值。至於氣候模型是否可「確證」，歐蕾斯柯斯等 (Oreskes et al., 1994: 643) 強烈表示以實際結果與模型的模擬結果相符去確證模型為真的論證犯了肯定後件的邏輯謬誤，同時簡短地表示雖科學哲學中韓培爾 (Carl Hempel) 式的確證理論中以例證 (instance) 確證

假說或律則，並且隨著例證的增加而增加其確證力，但這僅是增加確證的機率，不能就此推論其為真。

故歐蕾斯柯斯等 (Oreskes et al., 1994) 得到相當悲觀的結論：模型如小說 (novel) 一般是虛構的，雖具有真實的因素，但確證是不可能的。他們因此建議我們避免使用那些用來評價模型為真的相關「檢證」概念來評估模型、改用質性語言如「優」(excellent)、「好」(good)、「可」(fair)、「差」(poor) 等來評估各模擬模型與相對於觀察資料的表現。至於模型的功用，他們則主張模型可作為「啟發工具」(heuristics tools) 從事問題分析，進而協助模型操作者根據模擬成果做進一步研究，但模型最大的用途在否證而不在確證，在論文最後作者們寫道：「模型最有用之時是在被用來挑戰 (challenge) 而非檢證 (verify) 與生效 (validate) 既存的構想。任一科學家被要求使用模型去做檢證與生效某一業已確定的結果時，應抱持懷疑的態度」(1994: 644)。

模擬模型所具有的不確定性是否導致模擬模型僅能作為啟發性的工具，而對於科學實作沒有更積極的作用？不同於歐蕾斯柯斯所代表的悲觀觀點，洛依德 (Lloyd, 2009, 2010) 認為模擬模型的操作具有確證性，因此具有科學上的客觀性。強調科學理論對於建構氣候模型的重要性的學者 (如 Edwards, 1999 與 Petersen, 2006) 認為資料負載的特徵是一缺陷，模擬結果符合資料不但不能保證模型背後所依據理論是真實的、亦無法證明模型確實表徵了實在界。洛依德認為這些學者抱持化約主義 (reductionism) 觀點，認為氣候科學須基於 (化約為) 物理科學，因而主張模型的核心不應該由經驗資料來決定或影響。但洛依德不認為氣候模型需要來自更高階的理論法則去獲得參數值或進行參數化過程，他的立場是，作為應用科學的氣候科學是與經驗密切相關的學問，因此使用經驗來驗證氣候

模型本來就是合理的科學方法，而不會成為反對氣候模型之方法的客觀性理由。她也認為氣候科學本身並沒有完整掌握影響氣候因子的完整理論，而是建立在物理學和數學之基礎上的應用科學。因此氣候科學家的工作是將流體力學、熱力學等與大氣變化相關的物理理論以數學等式關聯起來，並應用到氣候系統之個別部的理論。冰層、植匹、土壤和水蒸氣以及大氣系統之間的複雜互動關聯被表徵在特定的氣候模型中。因此氣候模擬模型是理論接合 (theory articulation) 和應用的典型例子。

洛依德 (Lloyd, 2009: 216-219) 提出了三個支持氣候模型之客觀性的評價標準，首先是「模型適配」(model fit) 的程度。洛依德所稱之「適配」即為將模擬結果的模型與實際觀測資料進行比對的確證方法，適配代表了模型所包含之假設在特定面向或程度上吻合了真實世界，故此標準即是本文前述討論所探討的模型與實際現象的預測、說明與表徵的關係。洛依德認為雖然有學者 (Edwards, 2001; Parker, 2009) 主張氣候模擬模型存在有以調整參數校準模型以獲得較好的觀察值的主觀因素，而反對經驗適配的判準，她的立場表示不應完全排除經驗作為模型的判準。洛依德以對流層頂的溫度變化模擬為例，指出氣候模型的模擬結果與對流層頂的觀測數據相吻合，而此良好適配並沒有經過調整，故可作為模型的確證。洛依德接續指出適配的可靠性來源之一是證據的多樣性 (variety of evidence)，雖然他在此點上將不同種類的「多樣性」混雜地討論，但直觀而言，她表示即便是有特設與主觀因素的存在，若總體模擬模型的結果符合多項氣候現象，亦即氣候模型在不同變數和不同模型特徵下顯示出良好適配時，即可認為氣候模型得到現象的支持。在此洛依德表示她抱持貝氏確證論 (Bayesian confirmation) 的立場。簡言之，貝式確證指證據  $E$  確證假說  $H$  若  $H$  成立的先驗條件

機率大於  $H$  成立的先驗機率，即  $P(H|E) > P(H)$  (Talbot, 2015)。<sup>13</sup> 洛依德據此表示：若一模型有較多獨立證據支持，則其確證程度較高。最後，洛依德 (2009: 219-222) 引用 Weisberg (2006) 的穩健性 (robustness) 分析，佐證多元證據對模型之支持的重要性與可靠性。穩健性在科學研究中，如計量經濟學或統計學，指估計值不因變數或觀察值的增減而有顯著的改變 (Lu & White, 2014)，<sup>14</sup> 在此穩健性可指不同模型在進行相同時間和相同目標的模擬時都獲得相近結果的，或是同一模型輸入不同變數量時都得到相似結果的穩定現象，就氣候模型而言，如本文前述所提到的系集方法用同一初始條件來進行各模型模擬或是同一模型執行不同初始條件的模擬，若獲得同樣的趨勢變化或相近結果，便呈現模型的穩健性。洛依德以 Randall et al. (2007) 為證，指出他們的研究以模擬二十世紀全球均溫為目標，以系集方法並使用 14 個不同模型、共進行 58 個不同的模擬，這 58 個模型的平均與實際觀察到的資料曲線大致吻合。洛依德 (2009: 220) 認為這樣多元並高度適配的結果顯示了這些模型必定掌握了實在界氣候變化的結構或部分過程。相反地，如果諸模型模擬的結果模型彼此之間有很大變異，那麼這顯示了這些模型可能有誤。故我們可接受如下的歸納論證：若存在有充分數目的具有相同因果結構並符合現象的異質模型，則可以推論真實世界也具有與模型相同的因果結構。但不同模型都有相似結果，有可能是肇因於建模的社會收斂過程 (social convergence process) (2010: 979)，意指因為模型建構者或使用者可能共享了相同的模型建構意識和方法而造成的誤差。因此洛依德認為有必要考量模型的模擬結

---

<sup>13</sup> 關於貝氏確證理論請參見 Talbot (2015) 或 Lloyd (2009: 218) 附註 4 的短述。

<sup>14</sup> 經濟學穩健性分析的哲學評述請參見 Kuorikoski, Lehtinen, and Marchionni (2010)。

果的獨立性，當研究是彼此相互獨立的，即可確信穩健性的存在，而可確證模型表徵了實在或特定因果過程。

據此，洛依德主張根據這三點可以說明印證一模擬模型的客觀性來源。她認為如果我們只看模型較為不足之處來評估模型，則幾乎所有的理論或模型都會被拒絕。她的建議隱含了我們應試著去說明和瞭解氣候模型實作中的特點，以她所建議的適當判準來評價全球氣候模型，以了解其與經驗證據之間的确證關係。

## 伍、模型確證的哲學問題

由歐蕾斯柯斯與洛依德兩位科學哲學學者對氣候模擬模型的确證問題看法，我們可由學者對於模擬模型的不同科哲觀點，探究科學模型的哲學意涵。學者的共識是模型乃是表徵 (representation) 或表徵的工具 (representational tools)，但就模型的真值有不同的意見。歐蕾斯柯斯等 (Oreskes et al., 1994: 644) 認為表徵是模型作為啟發性工具的主要價值，但亦暗示模型的價值僅作為輔助研究的啟發性工具，但「不易證明 (其真值)」。歐蕾斯柯斯等如同當代模型論科學哲學家一般將模型作為科學中主要的啟發工具之一，認為模型對於引導推理的進行扮演重要的角色 (Morgan & Morrison, 1999)，並非認為模型可作為證明實在的表徵，他們引用卡特萊特 (Nancy Cartwright) (1983) 的論點，認為模型是虛構物 (fiction)。

但虛構物是否便據此不為真？卡特萊特 (Cartwright 1983: 153) 早期的作品認為模型是理想化 (idealization) 下的產物，但因模型的某些組成要素是不存在於真實世界的，因而不盡可由理想化的模型推導至真實世界，故模型是虛構的作品 (a work of fiction)。<sup>15</sup> 歐蕾

---

<sup>15</sup> 自不贅言 Cartwright 後期對模型的看法有所轉變。

斯柯斯等 (Oreskes et al., 1994) 將模型類比為小說自然也與由「虛構」的英文字彙 “fiction” 延伸它所指涉的「虛構小說」字義有關。消極者認為模型如虛構的故事，現實所發生之事不能證明虛構的故事是真的，但積極者會認為小說（特別是寫實小說）雖然是虛構的故事，但是其中的場景，甚至是人物與情節，都可能忠實反映現實世界所發生的情事，亦即是虛構小說的故事具有其真實性，甚至可能在現實生活中發生。所以驗證的方向不是由現實證明虛構，而是看虛構是否出現於現實世界。據此，歐雷斯柯斯等人對於氣候模擬的觀點和當代科學模型論中將模型視為是虛構物的觀點一致 (Cartwright, 1983; Frigg 2010; Suárez, 2009)。同理，模型的真實性可以由其內容或預測是否符合現實加以驗證，如范弗拉森 (van Fraassen, 1980) 的經驗適切性在科學哲學界中便被認為是以觀察判定模型的真值，而洛依德以模型適配、經驗適切性來評價模擬模型的觀點亦採取相同的歸納邏輯：若證據  $e_i$  與模型  $M$  的某一因素  $m_i$  相符，則我們可歸納得出  $M$  就此層面真實地表徵了真實世界。據此，洛依德的多元證據觀可表示為當有多個證據，如存在有  $e_i$  與  $e_j$  且  $i \neq j$  並分別對應於  $M$  中的因素  $m_i$  與  $m_j$  時，模型即具有更高的真值。利用相同的推理邏輯，甚至有學者 (Sugden, 2000, 2009) 認為我們可以由此推論出模型與現實世界具有相同的起因結構，因而模型是「可信的世界」(credible world)。<sup>16</sup>

所以，吾人若據此認為模型無法具有知識上的認知意義，則完全誤解當代模型論中「虛構物」的討論。由上述討論可知，學者指稱模型是虛構的，並非因為模型「完全不符合」真實世界，而是因為它「不完全符合」真實世界，兩者之差異大矣。科學哲學中關於

<sup>16</sup> 關於模型為可信世界的科哲討論，參見 *Erkenntnis* 2009 的專刊，與趙相科 (Chao, 2014) 的評論 (見註 18)。

「虛構」與虛構主義 (fictionalism) 的討論與科學實在論 (scientific realism) 的發展息息相關，但當代實在論問題的研究共識是以標的物做區分，如認為理論為真的理論實在論 (theory realism)、存有物為真的存有物實在論 (entity realism)，甚至測量與實驗等均有相關的實在論討論。故以模型是否「完全」符合真實世界做為模型是真實或虛構的斷然二分，隱含模型的整體論 (holism) 觀點，與當代科學哲學界對模型的認知有極大的差距。吾人應有「模型≠世界」的基本認知——模型飛機不是實際飛機、地球儀不是地球、華生 (James D. Watson) 與克里克 (Francis H. C. Crick) 用鐵線與厚紙板做的 DNA 模型不是真的 DNA、電腦模擬模型是人工智慧的產物，自然不是實際氣候體系。稱其為基本認知的原因是不論哲學或科學界幾乎不會存在有模型即為世界的看法，故我們不應以模型「完全不符合」真實世界的前提推論至模型無用論。在 Arthur Fine (1993: 16) 對科學哲學中的虛構主義 (fictionalism) 的分析中，相當明顯指出由理想化方式所建構而成的虛構物知識價值，藉由討論 Hans Vaihinger 的「擬似」(as if) 方法論，他表示理想化是科學實作中必然而然的要素。如圖像、電腦模擬、決策模型皆是科學虛構物的例證，也是科學模型的特質。

甚至如果我們詢問大氣科學家們「您是否相信氣候模擬模型是真的？」這樣的問題，幾乎不會得到否定的答案。<sup>17</sup> 由前述歐蕾斯柯斯等 (Oreskes et al., 1994) 對「檢證」、「確證」、「有效性」等概念的分析可知科學家們在實作中所使用的詞彙明顯不盡然等同於哲學中的定義相同，自然他們的「真」、「偽」詞彙亦是如此。況且科學家可能因相信模型所包含的物理定律為真，而認為模型為

---

<sup>17</sup> 作者之一曾於中央氣象局所舉辦的公開演講活動中非正式地就此問題詢問數位氣象學家，而皆得到肯定的答案。



真；因所包含的因果結構符合真實結構，而認為模型為真；因模型的預測值與觀測值一致，而認為模型為真。故單純的「相信大氣模擬模型為真」不盡然表示大氣科學家反對氣候模型是科學虛構物，僅能表示科學實作者對於氣候模型抱持著單純的實在 (realist) 觀點。況且科學哲學界另一共識是僅討論「近似真」(approximate truth)，雖然在科學哲學中尚無法完善地定義「近似」的概念，但是在科學模型的脈絡下可以理解為模型使用者利用模型表徵現實界的部分。若是如此，當模型「真實地」表徵了模型使用者所欲利用模型表徵之處，自然地模型使用者會認為氣候模型是「真的」。

由此觀之，歐蕾斯柯斯等 (Oreskes et al., 1994) 所指模型作為科學研究的啟發工具是正確的觀察，但也許應正面的看待此特質，積極地承認其為模型的優勢。以科學家的實作而言，一特定的氣候模型可能著眼於大氣的現象結構 (如國內外華人學者張智北和王斌的研究工作)、可能是用來掌握現象變化的一種速算法 (如唐景山的模型調校)、也可能只是想從現有資料去推出最可能的現象規律 (氣候模型的一般建構方式)，端看科學家的使用目的，以其工具價值作為評價，避免以傳統的真值標準來討論氣候模擬模型的確證問題。

洛依德的立場便可解釋為在模型被理解為表徵工具時應具備的標準。洛依德也同樣認為模型是一種科學家為了特定目的，而意圖使用模型來表徵世界之特定部分或面向之物，亦蘊含了一模擬模型只有部分對應了真實世界，而其他則否。舉例來說，科學家為瞭解或說明全球均溫的變化而建構了一個可適切表徵「全球均溫變化」的模擬模型，但這並不真實的反映地球表面的實際溫度，也不被當作是地表的實際溫度，而只是科學家用「均溫」的觀點來理解或解釋地球氣候的變化趨勢。洛依德師承范弗拉森，她借用范弗拉森的經驗適切性作為模型的判準，雖不盡然與范弗拉森 (van

Fraassen, 1980) 的定義完全相符，但已清楚的表現模型應僅說明已觀察到的現象之建構經驗主義 (constructive empiricism) 立場。但是洛依德的方法論點，不論是模型適切、多元證據和穩健性都是基於經驗證據對於模型的檢定，如同所有經驗主義者都無法迴避的歸納問題，其並不能完全規避歐雷斯柯斯等 (Oreskes et al., 1994) 所擔心的不充分決定論的問題，特別是由經驗資料的適切推論至模型與真實世界有相似的因果結構的歸納論點，由於真實因果結構的顯示關乎於對現象的因果說明的有效性，並與實際公共政策的制定息息相關，洛依德並未討論如何以經驗判準排除具有不同的因果結構的模型得出相同結果的可能性。<sup>18</sup>

另一方面，洛依德的確證理論遭受更注重經驗層面的哲學論述的挑戰。相對於洛依德的正面態度，帕克 (Parker, 2009, 2011) 因不確定性的存在而認為主張單純的經驗支持並無法作為驗證氣候模擬模型的判準。即便帕克和洛依德對於模型的本質抱持相似的模型使用者因特定目的而利用模型表徵特定目標的語意學派看法，但在確證的方法論上有相異之處，帕克亦不認為穩健性與多元證據可以是模型確證的判準，她指出這僅是以用實例的累積以增加確證力的方式，暗示與邏輯實證論韓培爾式的確證方法的連結，並重申既存氣候假說尚不足以完全說明大氣體系。同時模型是抽象化後的產物，故即便模型可以說明觀測值的經驗適切性，還是無法透過模型確證理論或假說的真值。由將模型視為表徵工具出發，帕克雖也關注不確定性，但她在此處所討論並不是建模過程的不確定性，而是指模擬值與觀察值之間的誤差。雖然建模過程的不確定因素與模擬

---

<sup>18</sup> Chao (2014) 已證明除非對於兩者的因果結構皆具有充分的知識並能夠建立兩者結構的表徵定理 (representation theorems)，否則科學實作中僅由模型結果與經驗資料相符而得出相似因果結構的推論是不可信的 (incredible)。

結果的不確定性為一體之兩面——因未知實際複雜系統中的相關因素而無法建構完美模型以得到符合實際現象的結果，但帕克據此批評洛依德 (Lloyd, 2009) 經驗適切性概念未考慮實際上估計誤差的狀況，並進而提出兩個評價模型的概念，第一是將經驗適切性修改為「目的適切性」(adequacy for purpose)，其意等同於本文前述語意觀點所認為模型使用者利用模型達到特定目的，並強調以是否適切的達到該目的為評價標準。她認為假說的確證在於 (1) 在模型適切於某特定目的前提下去決定所欲觀察之物為何；(2) 在模型適切於某特定目的前提下檢視結果與觀測值的配適程度 (Parker, 2009: 237)。這表示確證一模型是困難的，根據模型與經驗的密切交纏關係，無法像洛依德所主張能有原則性的確證標準，而必須視模型的表徵目的而調整、尋找不同類型的經驗證據來進行確證。如當科學家欲探討在 2100 年時地表平均溫度是否會升高攝氏 2 度的問題時，其所採取的模擬模型中所包含的假說不盡然是真實的或是符合經驗的，但是若該模型能夠利用所有的資訊並為模型使用者提供對地表平均溫度是否會升高攝氏 2 度的問題正確的解答，便符合模型使用者使用該模型目的 (Parker, 2009: 235-236)。第二是採納梅約 (Deborah Mayo) (1996) 所闡釋的「嚴謹驗證」(或「嚴謹檢定」) (severe testing) 概念，認為學者應採用在學理上能夠充分區分假設真偽的嚴謹檢定作為驗證的方式，以代替未有實作清楚操作定義的經驗適切性。

就第一點目的適切性而言，其實帕克與洛依德對於模型的看法並無二致，兩位皆服膺語意觀點，只是帕克 (Parker, 2009: 237) 更強調以目的的達成作為模型評價的判準。對她而言，僅以模擬結果與過去觀察值的符合作為經驗判準並不是嚴謹，須考量另兩個更重要的目的：說明 (explanatory) 目的與預測 (predictive) 目的。就第

二點嚴謹驗證而言，在科學哲學的發展中可觀察到 Mayo 所提出嚴謹驗證的定義是以證據對欲考察的假說達到更高機率驗證，但她的理論缺乏操作的定義，僅提供事後的合理化判準。同樣的，帕克 (2009) 關於檢定或驗證的看法中僅能原則性的提出數個實作上的配適性要點，或實作上常用的樣本外檢定 (out-of-sample tests) (如 2009: 238 之例所示)。樣本外檢定在各學科的實作中皆被廣泛使用為預測準確性的檢測，故可用來作為模型預測目的的判準，其他各式統計方法也可視為處理模擬值與觀察值之間誤差所產生的不確定性。但是就說明的目的而言，我們認為不僅是 Parker，本文所探討的數位科學哲學家皆極少論及氣候科學說明的部分。雖然諸位學者所提出的論點可看作最佳說明推論 (inference to the best explanation)，但是他們皆極少論及因果關係或起因解釋。以帕克 (2009: 241-243, 246-248) 為例，她甚至用「理由」(reasons) 一詞多於「原因」(causes)。<sup>19</sup> 該文並無明確指出氣候模擬模型的說明目的是因果說明或者是最佳說明，甚至她認為氣候模型的評價是以預測目的為主，學者應追求對變數預測的準確度，使預測值的誤差是在可接受範圍之內。故以目的適切與嚴謹驗證下的模型是否合理地說明氣候現象，尚需更多的論述來佐證。以 IPCC 報告為例，指出我們應追求估計是「可信的」(credible)、「合理的」或「似真的」(plausible)，模型作用則在於提供合理的數量估計，而洛依德的討論可以被重新詮釋為「今日的氣候模型是適切於提供未來氣候變遷特定面向『可信的』或『合理的』估計值的目的」(2009: 246)。當氣候模型的估計值是可信的，我們可以「相信」模型中的理論要素在許多層面上掌握了大氣變化的基本物理 (capture the basic physics)，故我們可接

---

<sup>19</sup> 參見 Donald Davidson (1963) 的經典之作中「起因」與「理由」之辯。

受模型的預測是合理的 (2009: 246-247)。但是我們不能據此認為該作者，或是認為我們可以宣稱該模型有可能掌握了完整的大氣因果結構，至多僅能由此歸納出模型的部分「起因路徑」(causal paths) 或「副結構」(substructures) 與真實近似。

對複雜的大氣現象僅有局部的理解是科學的事實，並不表示實際上科學的不可知論。美國國家科學院與英國皇家學會兩大學術組織共同編輯的文件《氣候變遷：證據與肇因》(*Climate Change: Evidence and Causes*) 中強烈的認為科學家們已經得出全球暖化的證據，並認為人類活動所造成的溫室效應是主要之原因，但同時也提及雖氣候模型對現象的解析能力從 1960 年代起就穩定提昇，但模型間的差異有其不確定性，因而無法確認哪個預測方向較為完善 (英國皇家學會與美國國家科學院，2015: 19-20)，這種看似互相矛盾的看法其實並不相違背。雖然模型對於完整大氣體系的模擬上有不足之處，但若模型設計的目的是針對溫室效應造成全球暖化的起因路徑，且合理的推論出此起因路徑，則我們可以相信此假說「溫室效應是造成全球暖化的原因」在模型中獲得確證。

## 陸、從模型中學習

從上述的說明，我們可以了解對氣候模擬模型本質的不同看法，反映出對模擬模型之確證觀念的差異。雖當代學者們皆視模擬模型為啟發與表徵工具，但對於如何藉此確證模型則有不同的看法。由悲觀地否定 (歐蕾斯柯斯)，到以經驗適切 (洛依德) 和目的適切 (帕克)，本文所述的這些不同的方法論立場，似乎意味「虛構」的模型並非是通往真理的道路，但是我們實是樂觀積極的說明模型在科學實作的重要性，以氣候模擬模型而言，其在大氣現象研究與

氣候變遷政策的重要性自是無與倫比。在前文對於各家確證氣候模型方法論的批判雖表示了不易由模型求得理論或假說的真值，僅能做部分的、局部的確證。但需提醒的是，這並不表示模型的因素不是實在的個體，除特設假設、輔助假設等建模過程中因事制宜的因素之外，諸如大氣環境的變數、甚至是個別的物理定律皆有一定的真實性，存在或成立於現實世界中。故其中之關鍵不在於個別因素的真值，而是如何應用所有已知的科學知識去組織因素而建構出良好的模型。治大國如烹小鮮，模型建構亦然。鮑曼 (Boumans, 1999) 的模型建構「食譜」說 (recipe account) 與卡特萊特 (如 Cartwright & Hardie, 2012) 將起因結構比喻為「起因蛋糕」(causal cake)，皆表示了模型建構者需發揮其技藝將相關因素治成，以建構出符合說明、預測或表徵目的的裝置。

不論是在科學界或是在哲學界，未能指出起因結構或機制的學說常有「黑盒子」之譏。但是由氣候模擬模型的個案觀之，即便是我們對現象系統的理解僅有部分的因果知識，對科學家而言，這般部分的知識已經足夠形成科學界對全球暖化的共識：地球均溫上升的事實是由人類活動所產生的溫室效應所造成。故模型作為分析工具，以「經驗適切性」可以說明模型在經驗科學研究中的重要性；「目的適切性」可以解釋模型的工具價值。更重要的是，這些實作的討論表示了科學研究可由模型或建模的過程中獲得科學知識與現象的理解。「從模型中學習」(learning from models) (Morgan & Morrison, 1999) 也許是科學家們使用模型作為啟發工具最重要的原因。在建模與分析的創意、操作與試錯過程中，逐漸地建立真實的假說，接近真實的現象，我們因此可對於如氣候模型般的開放複雜體系的研究有更積極樂觀的期待。

## 參考文獻

- 卓盈旻、盧孟明 (2009)。〈IPCC 第四期評估報告氣候模式對亞洲夏季季風模擬之分析〉，《大氣科學》，37, 2: 99-119。(Cho, Y.-M. & Lu, M.-M. [2009]. Asian summer monsoon simulated by 7 IPCC AR4 climate models. *Atmospheric Sciences*, 37, 2: 99-119.)
- 英國皇家學會與美國國家科學院 (編). (2015).《氣候變遷：證據與肇因》(中央研究院環境變遷研究中心、永續科學中心譯)。臺北：中央研究院。(The Royal Society and the US National Academy of Sciences [Ed.]. [2015]. *Climate change: Evidence and causes* [Research Center for Environmental Changes & Center for Sustainability Science, Academia Sinica, Trans.]. Taipei: Academia Sinica.)
- 陳正改 (1995)。《天氣與氣候學》。臺北：明文。(Chen, C.-K. [1995]. *Weather and climatology*. Taipei: Ming Wen.)
- 陳瑞麟 (2010)。《科學哲學：理論與歷史》。臺北：群學。(Chen, R.-L. [2010]. *Philosophy of science: A theoretical and historical introduction*. Taipei: Socio.)
- 葉天降、馮欽賜、柳再明、陳得松、黃康寧、陳雯美等 (2012)。〈中央氣象局數值天氣預報作業系統 (二)：預報模式概況〉，《氣象學報》，48, 4: 69-95。(Yeh, T.-C., Fong, C.-T., Liou, T.-M., Chen, D.-S., Huang, K.-N., Chen, W.-M., et al. [2012]. The numerical weather prediction system of the Central Weather Bureau [II]: Overview of forecast models. *Meteorological Bulletin*, 48, 4: 69-95.)
- 蔡清彥、柯文雄、許武榮 (1990)。《數值天氣預報》。臺北：聯經。(Tsay, C.-Y., Kau, W.-S., & Hsu, W.-R. [1990]. *Numerical weather prediction*. Taipei: Linking.)
- Ahrens, C. D. (2009). *Meteorology today: An introduction to weather, climate, and the environment* (10th ed.). Belmont, CA: Brooks/Cole.
- Boumans, M. J. (1999). Built-in justification. In M. S. Morgan & M. Morrison (Eds.), *Models as mediators: Perspectives on natural and social science*. (pp. 66-96). Cambridge, UK: Cambridge University Press.

- Cartwright, N. (1983). *How the laws of physics lie*. Oxford, UK: Oxford University Press.
- Cartwright, N., & Hardie, J. (2012). *Evidence-based policy: A practical guide to doing it better*. New York: Oxford University Press.
- Chang, C.-P., Ghil, M., Kuo, H.-C., Latif, M., Sui, C.-H., & Wallace, J. M. (2014). Understanding multidecadal climate changes. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 95, 2: 293–296.
- Chao, H.-K. (2014) Models and credibility. *Philosophy of the Social Sciences*, 44, 5: 588-605.
- Dahan Dalmedico, A. (2007). Models and simulations in climate change: Historical, epistemological, anthropological, and political aspects. In A. N. H. Creager, E. Lunbeck, & M. N. Wise (Eds.), *Science without laws: Model systems, cases, exemplary narratives* (pp. 125-156). Durham, NC: Duke University Press.
- Davidson, D. (1963). Actions, reasons, and causes. *Journal of Philosophy*, 60, 23: 685-700.
- Edwards, P. N. (1999). Global climate science, uncertainty and politics: Data-laden models, model-filtered data. *Science as Culture*, 8, 4: 437-472.
- Edwards, P. N. (2001). Representing the global atmosphere: Computer models, data, and knowledge about climate change. In C. A. Miller & P. N. Edwards (Eds.), *Changing the atmosphere: Expert knowledge and environmental governance* (pp. 31-65). Cambridge, MA: MIT Press.
- Edwards, P. N. (2010). *A vast machine: Computer models, climate data, and the politics of global warming*. Cambridge, MA: MIT Press.
- Fine, A. (1993). Fictionalism. *Midwest Studies in Philosophy*, 18: 1-18.
- Frigg, R. (2010). Models and fiction. *Synthese*, 172: 251-268.
- Frigg, R., & Reiss, J. (2009). The philosophy of simulation: Hot new issues or same old stew? *Synthese*, 169, 3: 593-613.
- Giere, R. N. (1988). *Explaining science: A cognitive approach*. Chicago: University of Chicago Press.
- Giere, R. N., (2009). Is computer simulation changing the face of experimentation? *Philosophical Studies*, 143, 1: 59-62.



- Jacques, P. J., Dunlap, R. E., & Freeman, M. (2008). The organisation of denial: Conservative think tanks and environmental scepticism. *Environmental Politics*, 17, 3: 349-385.
- Kuorikoski, J., Lehtinen, A., & Marchionni, C. (2010). Economic modelling as robustness analysis. *British Journal for the Philosophy of Science*, 61, 3: 541-567.
- Lenhard, J., & Winsberg, E. (2010). Holism, entrenchment, and the future of climate model pluralism. *Studies in History and Philosophy of Science Part B: Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, 41, 3: 253-262.
- Lloyd, E. A. (2009). Varieties of support and confirmation of climate models. *Proceedings of the Aristotelian Society*, 83, Suppl. 1: 213-232.
- Lloyd, E. A. (2010). Confirmation and robustness of climate models. *Philosophy of Science*, 77, 5: 971-984.
- Lu, X., & White, H. (2014). Robustness checks and robustness tests in applied economics. *Journal of Econometrics*, 178, 1: 194-206.
- Maslin, M., & Austin, P. (2012). Uncertainty: Climate models at their limit? *Nature*, 486, 7402: 183-184.
- Mayo, D. (1996). *Errors and the growth of experimental knowledge*. Chicago: University of Chicago Press.
- Morgan, M. S. (2003). Experiments without material intervention: Model experiments, virtual experiments, and virtually experiments. In H. Radder (Ed.), *The philosophy of scientific experimentation* (pp. 216-235). Pittsburgh, PA: University of Pittsburgh Press.
- Morgan, M. S., & Morrison, M. (Eds.). (1999). *Models as mediators: Perspectives on natural and social science*. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Morrison, M. (2009). Models, measurement and computer simulation: The changing face of experimentation. *Philosophical Studies*, 143, 1: 33-57.
- Oreskes, N. (1998). Evaluation (not validation) of quantitative models. *Environmental Health Perspectives*, 106, Suppl. 6: 1453-1460.

- Oreskes, N. (2010). My facts are better than your facts: Spreading good news about global warming. In M. S. Morgan & P. Howlett (Eds.), *How well do facts travel? The dissemination of reliable knowledge* (pp. 136-166). Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Oreskes, N., & Belitz, K. (2001). Philosophical issues in model assessment. In M. G. Anderson & P. D. Bates (Eds.), *Model validation: Perspectives in hydrological science* (pp. 23-41). London: John Wiley and Sons.
- Oreskes, N., & Conway, E. M. (2010). *Merchants of doubt: How a handful of scientists obscured the truth on issues from tobacco smoke to global warming*. London: Bloomsbury.
- Oreskes, N., Shrader-Frechette, K., & Belitz, K. (1994). Verification, validation, and confirmation of numerical models in the earth sciences. *Science*, 263, 5147: 641-646.
- Parker, W. S. (2008). Computer simulation through an error-statistical lens. *Synthese*, 163, 3: 371-384.
- Parker, W. S. (2009). Confirmation and adequacy-for-purpose in climate modelling. *Proceedings of the Aristotelian Society*, 83, Suppl. 1: 233-249.
- Parker, W. S. (2010). Predicting weather and climate: Uncertainty, ensembles and probability. *Studies in History and Philosophy of Science Part B: Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, 41, 3: 263-272.
- Parker, W. S. (2011). When climate models agree: The significance of robust model predictions. *Philosophy of Science*, 78, 4: 579-600.
- Petersen, A. C. (2006). *Simulating nature: A philosophical study of computer-simulation uncertainties and their role in climate science and policy advice*. Antwerpen, Belgium: Het Spinhuis.
- Randall, D. A., Wood, R. A., Bony, S., Colman, R., Fichet, T., Fyfe, J., et al. (2007). Climate models and their evaluation. In S. Solomon, D. Qin, M. Manning, M. Marquis, K. Averyt, M. Tignor, et al. (Eds.), *Climate change 2007: The physical science basis. Contribution of working group I to the fourth assessment report of the*

- intergovernmental panel on climate change* (pp. 589-662). Cambridge, UK: Cambridge University Press,.
- Suárez, M. (2009). Scientific fictions as rules of inference. In M. Suárez (Ed.), *Fictions in science: Philosophical essays on modeling and idealization* (pp. 158-178). New York: Routledge.
- Sugden, R. (2000). Credible worlds: The status of theoretical models in economics. *Journal of Economic Methodology*, 7, 1: 1-31.
- Sugden, R. (2009). Credible worlds, capacities and mechanisms. *Erkenntnis*, 70: 3-27.
- Talbott, W. (2015). Bayesian epistemology. In *The Stanford encyclopedia of philosophy*. Retrieved from <http://plato.stanford.edu/archives/sum2015/entries/epistemology-bayesian/>
- van Fraassen, B. (1980). *The scientific image*. Oxford, UK: Oxford University Press.
- Weisberg, M. (2006). Robustness analysis. *Philosophy of Science*, 73, 5: 730-742.
- Winsberg, E. (1999). Sanctioning models: The epistemology of simulation. *Science in Context*, 12, 2: 275-292.
- Winsberg, E. (2003). Simulated experiments: Methodology for a virtual world. *Philosophy of Science*, 70, 1: 105-125
- Winsberg, E. (2009). A tale of two methods. *Synthese*, 169, 3: 575-592.
- Winsberg, E. (2015). Computer simulations in science. In *The Stanford encyclopedia of philosophy*. Retrieved from <http://plato.stanford.edu/archives/sum2015/entries/simulations-science/>

## Confirmation of Climate Models

*Hsiang-Ke Chao*

Department of Economics, National Tsing Hua University  
No. 101, Sec. 2, Kuang-Fu Road, Hsinchu 30013, Taiwan  
E-mail: hkchao@mx.nthu.edu.tw

*Hsien-I Chiu*

Department of Economics, National Tsing Hua University  
No. 101, Sec. 2, Kuang-Fu Road, Hsinchu 30013, Taiwan  
E-mail: E-mail: hsieni@mx.nthu.edu.tw

### Abstract

By critically appraising the logical positivist theory of confirmation and the philosophical accounts for climate simulation models, this paper investigates the issues of model confirmation in the contexts of scientific practice of climate study. The epistemic merits of simulation models, which are regarded as fictions due to the idealization in the model building process, are to serve as heuristic tools the model users use to achieve a certain purposes. In climate sciences, models are thus evaluated according to whether or not they are adequate for the purposes of empirical examinations.

**Key Words:** climate change, scientific models, climate simulation models, confirmation, uncertainty