

全球暖化問題的科學認識

劉雅章

早在十九世紀，人類就已經察覺到人為活動可能對地球氣候產生影響了。著名法國數學家傅里葉 (Jean-Baptiste Fourier) 在1827年認識到大氣有如玻璃瓶，會把陽光的熱能困在其中，這後來發展成「溫室效應」觀念，而那正是全球暖化的主要成因。1896年瑞典化學家亞雷尼烏斯 (Svante Arrhenius) 首次留意到大氣中的二氧化碳濃度上升會導致氣溫上升。到二十世紀，人類開始發展監測大氣二氧化碳含量及其他全球環境指標 (例如氣溫、降水、冰蓋等) 的系統性研究。1970年夏天，麻省理工學院贊助了一個為期一月的工作坊，邀集四十多位知名科學家和專業人士就不同污染物的排放率、排放渠道及其對全球影響提供意見^①。筆者當時猶在香港中文大學攻讀物理本科，無意中在胡忠圖書館得見此報告，深為其視野之弘遠以及與人類前途關聯之密切所觸動，自是對大氣科學發生興趣，迄今已三十餘載，回溯前塵，實感慨系之。

一 IPCC 計劃

今天，透過國際合作，我們對地球氣候系統以及人為活動潛在影響的理解，獲得了巨大進步。聯合國「政府間氣候變化專業委員會」(Intergovernmental Panel on Climate Change, 簡稱IPCC) 公布的一系列評估報告，代表了科學界在這方面知識最完整、最權威的總結。以下我們先就此計劃作個簡略的綜述。IPCC委員會在1988年由聯合國環境計劃 (Environment Programme) 與世界氣象組織 (World Meteorological Organization) 聯合成立，責任是就全球氣候變化的技術和社會層面，向世界提供客觀而具透明度的建議。委員會屬下分為三個工作小組，分別負責評估科學資訊，評估社會經濟影響和制訂應對措施或者緩和策略。它本身並不做研究，但成員在氣候研究方面都各有專長，所以可視為全球性的專家會議。它分別在1990、1995、2001和2007年發表了評估報告。為準備這些文件，各小組都建立了縝密的程序：報告的每一章先由熟悉有關課題的專

IPCC委員會在1988年由聯合國環境計劃與世界氣象組織聯合成立，責任是就全球氣候變化的技術和社會層面，向世界提供客觀而具透明度的建議。委員會屬下分為三個工作小組，負責評估科學資訊、社會經濟影響和制訂應對措施或者緩和策略。

家團隊撰寫初稿，然後要經過兩輪評議，第一輪由其他專家審議，第二輪由專家會同各國政府代表審議，最後定本還要由作者以及各國政府代表在全體大會上議決通過；至於濃縮的「致決策者摘要」(Summary for Policymakers) 也同樣要由大會字斟句酌，然後才批准發表。

IPCC那麼慎重地草擬和發表的多份評估報告，自然都成為了國際合作應付氣候變化這全球性問題的里程碑。1992年在里約熱內盧制訂的《聯合國氣候變化框架公約》(United Nations Framework Convention on Climate Change, 簡稱UNFCCC) 就是以委員會第一次評估報告為商討基礎。1997年的《京都協定書》(Kyoto Protocol) 要求締約國承諾致力減低二氧化碳和其他溫室氣體排放，其動力來自第二次評估報告。至於UNFCCC締約國周年大會則以第三次評估報告的最新資料作為其討論基礎。如今萬方期待的第四次評估報告也由第一、第二、第三工作小組分別在2007年2月(巴黎)、4月(布魯塞爾)和5月(曼谷)隆重發表了，這是整個氣象學界多方交流與合作的成果。例如，第一工作小組(科學基礎)報告即由40個不同政府所提名的150位主要作者以及450位輔助作者合作草擬，其工作量之繁重，可見一斑。筆者及本研究實驗室的多位同事有幸參與其事，深感榮幸。此草稿由600多位評審員審核，他們一共提出了30,000項意見；然後各位作者又就評審員的每項意見作出回應，並且要得到評審員的認可。最後，由113個國家派出的300位代表，經過了四日四夜馬拉松式的逐字討論及修訂後，才得以完成「致決策者摘要」這份總結性文件。

第一工作小組的第四次評估報告分十一章，全長將近千頁之譜，內容涵蓋了所有關於氣候變化的科學課題。這篇短文目的就在於為本刊一般讀者概括介紹該報告的主要內容，包括影響氣候的大氣成分、氣候系統各部分錄得的變化、這些變化與人類活動關係的概況、數值模型對未來氣候變化的預測，等等。本文所引用的數據都來自該評估報告，有意作更深入了解或者研究的讀者請參閱報告原文^②。

目前進行有關溫室效應的研究仍然非常困難，問題在於氣候系統裏面有許多高度互動的複雜過程，它們在不同時空尺度發生作用，其中涉及大氣、海洋、冰雪圈(例如大陸和海洋的冰層)、地表(例如植被、地下水源、河川)、水文循環(雲層、降雨)，等等。

二 氣候變化的人為驅動因素

溫室效應的基本原理並不複雜，筆者在十多年前已於本刊撰文解釋過^③。簡單地說，地球吸收了太陽輻射能量之後，倘若要保持平衡，就必須釋放出相等能量到太空中去。地球表面溫度比太陽低，所以散失能量的機制以紅外線的輻射為主。然而，地球大氣層中某些氣體對於可見光和紅外輻射的作用是不一樣的：以可見光為主的陽光可以透過這些氣體射進來，但這些氣體卻會阻擋地球表面射往太空的紅外輻射，從而把相關能量再輻射回地球表面。因此，這些氣體的作用正如傅里葉所說，好像溫室的玻璃幕牆，一方面讓陽光通過使溫室內部變暖，另一方面阻礙溫室內的能量逃逸出去，從而阻止溫室內的能量散失。因此地球大氣中的溫室氣體濃度愈高，平均而言，全球的溫度也就愈高。這個機制的原理已經十分清楚了，目前仍然在進行的大量研究則着重於它在不同地理區域的作用。這方面的研究仍然非常困難，問題在於氣候系統裏面有許

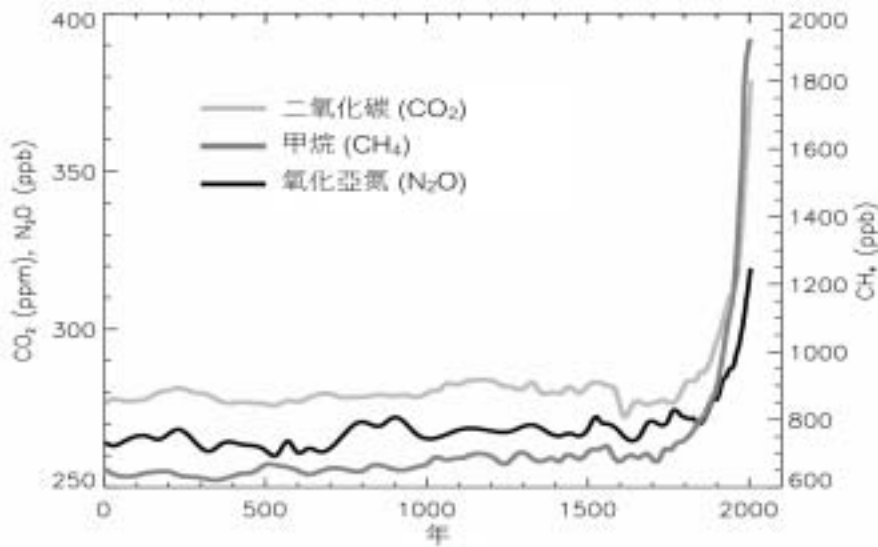


圖1 過去二千年大氣中二氧化碳、甲烷及氧化亞氮濃度的變化。圖中的單位以百萬分率 (ppm) 或十億分率 (ppb) 計算。(資料來源：IPCC第四次評估報告)

多高度互動的複雜過程，它們在不同時空尺度發生作用，其中涉及大氣、海洋、冰雪圈（例如大陸和海洋的冰層）、地表（例如植被、地下水源、河川）、水文循環（雲層、降雨），等等。

人類活動產生的溫室氣體，最重要的有二氧化碳、甲烷和氧化亞氮。圖1顯示這幾種氣體二千年來在大氣中的濃度變化。二氧化碳的主要來源，一是燃燒化石燃料，二是毀林及燃燒木材等生物質。以南極鑽探出來的冰芯紀錄推斷，二氧化碳濃度的自然漲落範圍是180-330 ppm (parts per million，即百萬分率，180 ppm = 0.018%)。但人為排放所造成的二氧化碳濃度上升，則遠超過這個範圍。工業時代前夕（1750年左右）濃度為280 ppm，到2005年則已經上升至379 ppm，而當代二氧化碳的增加率為每年1.9 ppm。甲烷的主要來源是農業活動和燃燒化石燃料，它們使甲烷濃度從工業時代前夕的715 ppb (parts per billion，即十億分率) 上升到2005年的1,774 ppb，遠遠超過自然漲落範圍（320-790 ppb）。氧化亞氮濃度從工業時代前夕的270 ppb增加到2005年的319 ppb，這增幅的三分之一是由農業活動所致。除了以上三種氣體之外，我們知道對流層的臭氧（這是由氧化亞氮及一氧化碳的排放及其化學變化所產生）及鹵碳化合物（主要來自工業溶劑、冷卻劑及塑膠），對地球氣候暖化效應也有作用。

各種溫室氣體對於輻射的作用有不同強度的影響。根據第四次評估報告，這些效應可以用所謂「影響因素」(impact factor) 衡量，而某大氣成分（以2005年錄得的含量為標準）的影響因素，則定義為由該成分氣體所導致的，通過地球表面單位面積的功率變化。比較影響因素可知，二氧化碳對溫室暖化效應的貢獻最大，其強度為每平方米1.66瓦，這大致相當於距離一個40瓦電燈泡1.5米處所感受到的熱。與此相比，正午太陽照射的功率密度為每平方米1,380瓦。甲烷、氧化亞氮、對流層臭氧和鹵碳化合物的影響因素分別是二氧化碳強度的29%、10%、21%和20%。

各種溫室氣體對於輻射的作用有不同強度的影響。這些效應可以用所謂「影響因素」衡量，比較影響因素可知，二氧化碳對溫室暖化效應的貢獻最大，其強度為每平方米1.66瓦，這大致相當於距離一個40瓦電燈泡1.5米處所感受到的熱。

人類活動所排放的，除了溫室氣體之外，還有大量懸浮微粒物質，而且排放量正日益增加。這些微粒通稱「氣溶膠」(aerosol)，它們無論是固態、液態、固液混合態，都非常之輕，足以懸浮於空氣之中。氣溶膠的主要成分是硫化物、氮化物及不同形式的碳和塵埃。近年世界各地的人口密集區出現朦朧天色的頻率明顯增加，這現象可以歸因於大氣中氣溶膠的含量上升。這些微量物質對氣候系統也有重要影響，其中最直接的是將陽光反射回太空，因而減少了到達地球表面的太陽能量，產生冷卻作用；此外，懸浮粒子還可以成為水氣凝結成微細水滴的核心，因此會導致雲量增加，由於雲層會加強陽光反射，所以氣溶膠還有間接冷卻作用。據粗略估計，氣溶膠的直接與間接冷卻作用會分別抵消30%與42%之多的二氧化碳暖化作用，即統共抵消達72%。另一方面，所有其他溫室氣體(即甲烷、氧化亞氮、臭氧和鹵碳化合物)的暖化作用合計，則大約相當於二氧化碳的80%，這與氣溶膠的冷卻作用正好大致相抵而略有餘，因此全部溫室氣體加上氣溶膠的作用，就大致等於二氧化碳的單獨暖化作用。

不過，必須強調，上述氣溶膠的冷卻作用，其強度及空間分佈都只是非常粗略的估計而已：它直接引起的全球平均冷卻強度，估計值上限比下限高9倍之多；間接作用的估值上限比下限也高達6倍。它所驅動的氣候反應估值之所以會有如此巨大的不確定範圍，主要反映我們對氣溶膠、輻射傳遞、雲層形成等不同過程及其相互作用的認識還是非常有限，這可以說是氣候變化研究中最薄弱的一環。

重構地球近年的氣候史，主要有兩個困難：首先是氣候本身有大幅度和頻繁的自然變化，這掩蓋了相對細微的長期趨勢；其次是在不同地區、不同時期以完全不同手段測量所得到的許多數據難以互相比較。

三 近年觀測所得的氣候變化

科學家花了很大工夫重構地球近年的氣候史，但這類研究非常困難。主要原因有兩個：首先是氣候本身有大幅度和頻繁的自然變化，這掩蓋了相對細微的長期趨勢，也就是說「噪音」掩蓋「訊號」，而這問題在地區性現象尤其嚴重；其次是在不同地區、不同時期以完全不同手段(例如直接量度和以衛星遙感技術推斷)測量所得到的許多數據難以互相比較。無論如何，通過大量努力，我們對關鍵氣候指標演化的認識，較以前已經不可同日而語了。其中最值得留意的，是下列的長期趨勢。

- 1906至2005年期間，全球地表平均溫度上升了0.74°C。在二十世紀，全球有明顯愈來愈厲害的暖化趨勢。過去五十年的趨勢值，比整個世紀的趨勢值還大一倍。在1995至2006年這十二年間，有十一年是1859年以來儀器錄得溫度紀錄中最熱的年份。此外，在地球表面以上數公里的大氣層，最近數十年也錄得相似的暖化速率；同時暖化也正在全球海洋發生，深至海底3,000米都錄得溫度上升。
- 陸地冰蓋或雪蓋範圍，包括高山上的冰川和冰帽，正在縮小。格陵蘭和南極冰棚正因冰流速增加和額外融化而縮小。
- 二十世紀全球海平面上升了0.17米，在1993至2003年期間上升趨勢明顯加速。在此十年間，57%的升幅是海水因溫度上升而膨脹，28%是由於冰川或冰帽融化，15%是由於格陵蘭及南極冰棚的融化。

基於這些觀測證據彼此之間的一致性，第四次評估報告明確指出，氣候系統最近的暖化已經是「無可置疑」。把上述儀器錄得的氣候紀錄與古氣候史指標（這是靠諸如樹木年輪和冰芯等間接資料推斷出來）相比較，暖化結論就得到進一步支持：這研究顯示，倘若以五十年為一期，那麼最近一期（即過往半世紀）的溫度升幅，遠遠超越過去1,300年間任何一期的升幅。

除了上述全球性數據，下列尺度較小的區域性氣候變化也很值得留意：

- 北極洋海盆的暖化速率是全球平均值的2倍。自1974年以來，此地區的海冰範圍在夏季以每十年7.4%的速率縮小；過去二十年間此地區的永久凍土層溫度上升了3°C。高緯度地區暖化加劇，部分是以下正回饋循環的結果：溫室效應產生的暖化加速冰雪融化；冰蓋、雪蓋消失則減低陸地和海洋表面對陽光的反射率，這導致太陽輻射吸收增加，由是暖化加劇，原初引發這過程的擾動得以再次加強，形成不斷增強的循環圈。
- 許多地區都有詳細降水紀錄，從而可以整理出長時間尺度的趨勢。或許讀者最有興趣的應當是，北亞和中亞部分地區降水量上升，南亞部分地區降水量下降。過去三十年間，尤其在熱帶和亞熱帶地區，旱災愈來愈嚴重，災期愈來愈長。陸上極端性的降水事件（雨雪霜雹等）的次數也愈來愈頻密。降水的長期變化與大氣層的氣流系統有關，而大氣環流則受制於海洋和陸地表面的邊界條件。溫室氣體和氣溶膠對這些邊界條件都起着一定作用，從而亦影響到各地的降水狀況。
- 與全球溫度的上升趨勢相關，酷熱天氣（例如持續熱浪）愈來愈頻密，寒冷天氣則愈來愈罕見。
- 觀測證據顯示，近數十年北大西洋強烈熱帶氣旋（颶風與颱風）的活動更形活躍，這可能與海面溫度上升有關連：海水蒸發率和大氣的水氣含量上升導致熱帶對流區所釋放的潛熱增加，這就為更多、更強熱帶氣旋的形成提供了額外的能量。

科學界目前正在努力探索，人為排放的溫室氣體和氣溶膠，究竟在多大程度上能夠解釋近年氣候變化的各類訊號。在這方面最重要的工具，就是由各研究機構所發展的氣候模型。

四 人為因素對近年氣候變化的影響

科學界目前正在努力探索，人為排放的溫室氣體和氣溶膠，究竟在多大程度上能夠解釋近年氣候變化的各類訊號。在這方面最重要的工具，就是由各研究機構（包括中、日、韓各地的研究中心）所發展的氣候模型。模型基本上是反映氣候系統運作機制和相關物理定律的複雜電腦程式，通過這些程式，就可以模擬種種現象和過程，例如大氣和海洋運動、不同波段輻射的能量傳遞、雲量和降水、大氣海洋之間和大氣陸地之間的能量和動量傳遞、植被和地下水系統的效應、陸冰和海冰生成和消融機制，等等。較全面的模型更考慮到大氣圈、水圈、生物圈這些不同儲存庫內微量成分物質的交換與輸送。這些模型具有動態功能。這動態功能主要是指兩方面。第一，它可以根據某個時間的起始狀

況，以及其後相關條件的改變(例如日照和火山爆發所釋放到空中的灰塵)，來計算該時間之後的氣候變化，這就成為氣候預測的根據。第二，在氣候變化的計算中，它還可以作出不同的假設，從而辨別各類特殊因素的效應。例如，模型可以對大氣中的溫室氣體濃度作出各種不同假設，甚至假定完全沒有人為排放溫室氣體。我們將計算所得結果比較，就可以分辨出人為排放的溫室氣體在過去百年或者五十年對於氣候變化所產生的作用，倘若再將之與實測數據比較，則論據就更為確切不移了。除了溫室氣體以外，人為排放氣溶膠的後果也同樣可以通過模擬而確定。

上述模擬研究提供了全面和堅實的證據，證明人類活動確實是導致近數十年暖化趨勢的主要因素：除了地表溫度以外，海水溫度、海平面、極端降水、極端冷熱天氣出現頻率、風向與風力分佈、熱帶氣旋活動等許多氣候指標觀測所錄得的變化，在不同程度上都可歸因於人類活動的影響。科學工作者對溫室氣體和氣溶膠也分別進行了模型實驗，用以評估它們對氣候變化的影響。這些工作印證了氣溶膠引起的冷卻作用，的確部分地抵消了溫室氣體產生的暖化效應。再者，仔細審視這些及其他實驗的結果，我們對不同驅動因素引起特定氣候反應的物理機制，也獲得了更深刻的科學理解。

模擬研究提供了全面和堅實的證據，證明人類活動確實是導致近數十年暖化趨勢的主要因素：除了地表溫度以外，海水溫度、海平面、極端降水、極端冷熱天氣出現頻率、風向與風力分佈、熱帶氣旋活動等許多氣候指標觀測所錄得的變化，在不同程度上都可歸因於人類活動的影響。

五 對未來氣候變化的預計

用以模擬上世紀氣候的追溯性模型也可以用作預計未來氣候變化的工具。我們只要以近期情況作為初始設定，就可以逐步推演出二十一世紀及以後的情況。當然，在這個實驗過程中，大氣中溫室氣體和氣溶膠含量水平的時間變化，需要根據不同「排放情景」來設定，也就是成為輸入數據的一部分。至於「排放情景」本身，則要根據未來經濟、人口、燃料用量組合、經濟與環境政策融合程度等因素來構造。具體而言，我們着重考慮的有下列三個「排放情景」：

- **B1 (低排放量)**：世界迅速轉向服務型和資訊型經濟；世界人口在二十一世紀中葉達到最高峰，然後下降；邁向社會經濟、環境可持續發展的全球性方案受到重視；清潔和有效運用資源的技術得到大量採用；2100年二氧化碳含量等效水平約為600 ppm。
- **A1B (中排放量)**：經濟迅速增長；人口趨勢與B1相同；不同地區的文化、社會經濟出現融合；化石燃料與非化石燃料的用量比例達至平衡；2100年二氧化碳含量等效水平約為850 ppm。
- **A2 (高排放量)**：經濟、技術發展以地域為主導，因此顯得不協調；人口持續增加；各區域強調自力更生和保持本土特徵；2100年二氧化碳含量等效水平達1250 ppm。

由此推算出的全球氣候變化預測，可以概括介紹如下：

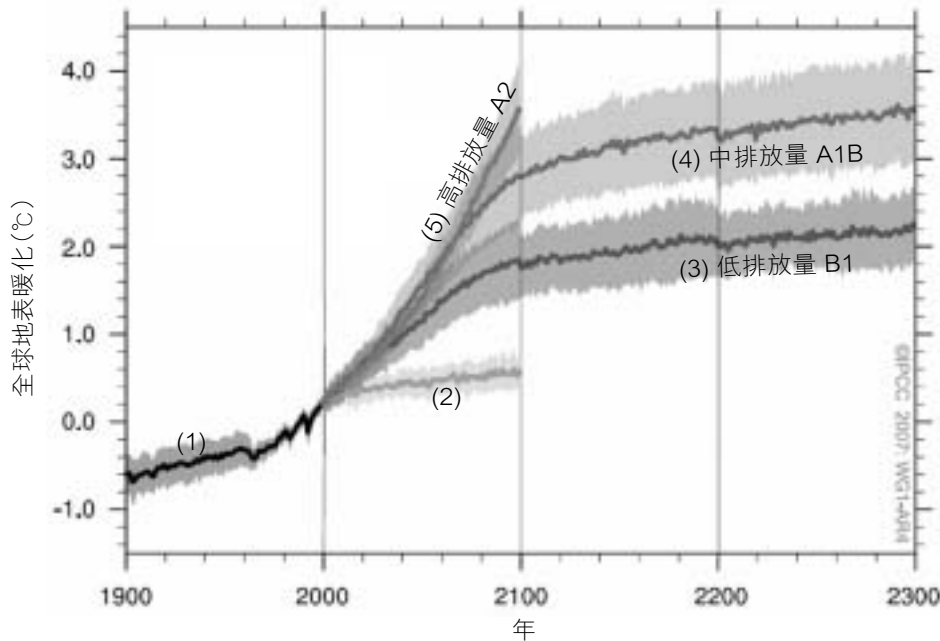


圖2 地表平均溫度上升的長期預測：(1)包括自然及人為因素的二十世紀模型值；(2)將所有因素固定於二十世紀值的二十一世紀預測；(3)、(4)、(5)分別為低、中、高排放量情景下的二十一世紀預測；(3)、(4)兩項預測在二十二世紀與二十三世紀之伸延乃基於排放量固定於二十一世紀末之假定。曲線代表不同模型結果的平均值，陰影區代表不同模型結果之間的標準偏差。(資料來源：IPCC第四次評估報告)

- 根據低、中、高排放量三個情景估計，二十一世紀全球平均表面溫度的總升幅分別是 1.8°C 、 2.8°C 、 3.4°C ，但在未來二十年間，三個情景中的暖化趨勢都是每十年平均升溫 0.2°C 左右；即使人為驅動因素保持在2000年的水平，未來二十年間升溫也會達到每十年 0.1°C 。但在二十年之後，升溫則會加劇。即使人為驅動因素在2100年之後能夠固定在低中水平，到2200年溫度仍然會再上升 0.5°C 左右(圖2)。
- 根據低、中、高排放量三個情景估計，二十一世紀海平面總升幅的範圍分別為 $0.18\text{-}0.38$ 米、 $0.21\text{-}0.48$ 米、 $0.23\text{-}0.51$ 米。即使人為驅動因素在2100年之後能夠固定在中等排放水平，由於熱量傳遞至深海的速度很慢，所以海水仍會繼續因受熱而膨脹，效應持續至2300年，屆時海平面將再上升 $0.3\text{-}0.8$ 米。如果暖化長期持續，使格陵蘭冰棚完全融化消失，則海平面會再上升約7米。這個幅度的上升會使中國東部及南部海岸許多低窪地帶被淹浸，包括香港、廣州、上海、天津一帶的人口稠密地區。
- 大氣中二氧化碳的壽命相當長，海洋對溫室效應的反應也十分緩慢。因此，由過往及未來人為二氧化碳排放所引致的溫度與海平面上升現象，將會持續千年以上。

除了上面提到的全球平均值，氣候模型也能預計不同地區的變化情況。

- 由於海水熱容量比陸地表面大，大陸上的溫度升幅度會明顯比海洋或者全球平均值為高(圖3)。由於前面已經討論過的冰雪融解所產生的正反饋，北極地

用以模擬上世紀氣候的追溯性模型也可以用作預計未來氣候變化的工具。我們只要以近期情況作為初始設定，就可以逐步推演出二十一世紀及以後的情況。

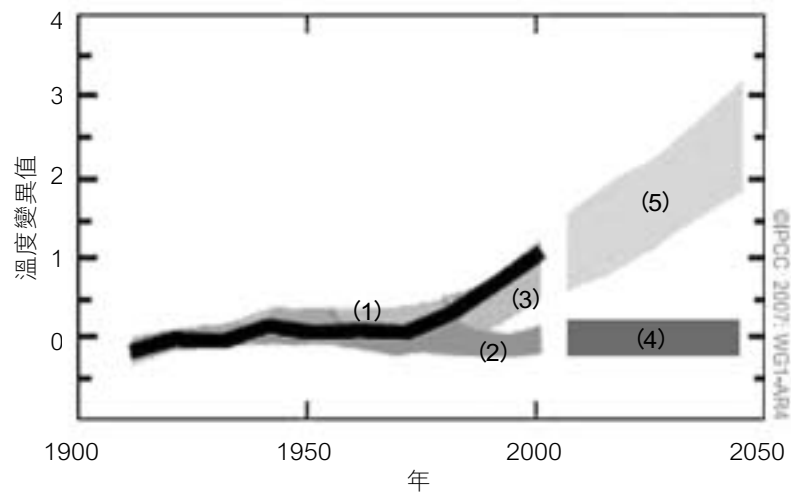


圖3 過去與二十一世紀大陸地表溫度變異：(1)粗黑線：實測數據；(2)僅包括自然因素之模型值(二十世紀)；(3)包括自然以及人為因素之模型值(二十世紀)；(4)僅包括(自二十世紀數據推斷所得)自然因素的預測(二十一世紀上半葉)；(5)在中排放量(A1B)情景下的預測(二十一世紀上半葉)。除實測數據外所有其他模型值之線寬均反映準確度處於5%-95%之間的期待值。此圖所實際代表的，是亞洲大陸的平均值，但其他各大洲的相應圖像亦大抵與此相似。注意模型對人為和自然因素的綜合反應(3和5)明顯地強於其對同期自然因素的單獨反應(2和4)。也注意模型在二十世紀對人為和自然因素的綜合反應(3)與實測數據(1)頗為符合。(資料來源：IPCC第四次評估報告)

區及高緯度地區，預計將是暖化最厲害的區域；至於南方海洋及部分北大西洋的暖化程度，則由於海洋環流的特殊結構(那有助於減低溫室效應所造成的暖化)而會顯得較弱。

到二十一世紀末，預計中國大部分區域的溫度會上升2-4°C。分析中國不同城市當前的氣候數據，就可以推算出，一個世紀後青島全年平均溫度將約略等於今天的上海，哈爾濱夏天氣溫將接近今天的北京，福州冬天氣溫將接近今天的廣州。

- 到二十一世紀末，預計中國大部分區域的溫度會上升2-4°C。分析中國不同城市當前的氣候數據，就可以推算出，一個世紀後青島全年平均溫度將約略等於今天的上海，哈爾濱夏天氣溫將接近今天的北京，福州冬天氣溫將接近今天的廣州。
- 大部分模型都預計高緯度地區降水量有10%以上的增加。這個氣候反應，部分是出於強西風帶和溫帶風暴的極向移動，部分也由於此區域內暖化加劇導致局地氣團含水氣量增加。赤道附近對流性雨帶將會增強，而南北半球亞熱帶地區則出現稍闊的降水減少地帶。這很可能是由於此地區的大尺度大氣環流圈強度和空間範圍因溫室暖化而改變。中國地區最值得留意的訊號是華北在冬季降水量的增加。
- 模型也預計地面上的雪蓋範圍將縮小，特別是南北兩極地區海冰範圍持續縮小。事實上，北極海冰可能在二十一世紀末的夏季完全消失。另外，極端高溫及高降水量天氣出現的頻率將大大增加，從而導致熱帶氣旋增強。
- 模型預計，隨着氣候暖化，海洋及陸地儲存庫對大氣中二氧化碳的吸收將減少，因此人為排放的二氧化碳將有更大比例留在大氣中。這種由溫室氣體導致的氣候變化以及地球碳循環之間的回饋作用，到2100年可能導致溫度額外上升1°C以上。
- 氣象學者長久以來十分關注大西洋盆地內的一個大規模海洋環流圈的未來動向。氣候歷史紀錄顯示，此環流系統的強度變化可能引起地球不同地區氣候

的突然變化。本刊近年的一篇報導已對這個現象發生的機制有詳細描述^④。有推測指，溫室效應加劇所造成的暖化，可能減低北大西洋近表面北向暖流的流量，因而導致北歐及部分北極盆地溫度下降。第四次評估報告的模型預計結果顯示，二十一世紀大西洋環流大約將減慢25%，情況並不算十分嚴重，它由此產生的冷卻作用，將被溫室暖化的大趨勢所掩蓋。

六 確定與不確定

比較一下IPCC第四次評估報告與過往三份報告所載的研究結果，就會發現我們對氣候變化的科學理解及預測能力都已經有大幅度進步，這有賴於以下因素：獲得更完整的觀測和模型推算數據；對數據所含信息有更精確的推斷和比對；改良模擬相關過程的模型；以及發展共同準則來衡量各模型預測的可信程度。由於這些進展，我們對第四次評估報告所着意提出的部分結論，和對過往與未來氣候變化的量化估計，都有了更大信心。最根本的是，報告實際上肯定（即這有超過95%機會正確）氣候暖化的趨勢在二十一世紀將會持續，而全球氣候在過去五十年的變化不能單單歸因於自然驅動因素（圖3）。下列評估結果也都有很高的置信水平，也就是有很大機會（超過90%）是正確的：

- 觀測錄得的溫室氣體人為排放量上升，是1950年代以來平均溫度上升的原因。
- 預計二十一世紀的氣候暖化和其他變化將較二十世紀嚴重。
- 在1960年代後，出現寒日和寒夜的頻率減少，而暖日和暖夜的頻率增加；預計溫暖期和熱浪頻率，在二十一世紀將會增加。
- 預計在二十一世紀，世界大部分地區出現大幅降水的頻率，及在高緯度地區的總降水量都會增加。
- 格陵蘭冰棚和南極冰棚縮小，是1993至2003年間海水水位上升的部分原因。

雖然我們對氣候變化的科學知識已增加不少，但是仍有幾個層面是我們仍未能充分掌握的。未來更準確和更可靠的評估有賴以下研究領域的進展。

- 對於各地雲層的不同特性（例如雲的種類、雲頂和雲底的高度、對輻射的反射率和吸收率、降水形式和降水量等等）、雲層和降水變化與相關大氣環流之間相互作用、溫室效應加劇造成的暖化對兩者的影響，我們的理解仍然有限。
- 格陵蘭與南極冰棚的狀況對海平面的變化有莫大的影響。陸冰表面質量平衡過程的性質，冰流的動態機制對預計冰棚未來狀況十分重要，而我們對這些過程和機制的了解仍然是很初步的。
- 由於需要氣候變化的區域細節資料，我們得不斷努力去了解及預計在小空間尺度中，氣候對不同驅動因素的反應。這些工作可讓我們更全面地認識區域氣候過程之間的相互作用，也讓我們能進行更高空間分辨率的氣候模型實驗。

IPCC第四次評估報告對氣候變化的科學理解及預測能力都已經有大幅度進步，這有賴於更完整的觀測和模型推算數據；對數據所含信息有更精確的推斷和比對；改良模擬相關過程的模型；以及發展共同準則來衡量各模型預測的可信程度。

- 我們需要更詳細地評估氣候變化對各地天氣現象的統計特性(例如所謂十年一遇、百年一遇等不同嚴重級別事件的機率分佈)的影響。氣候變化會導致惡劣天氣事件(如洪澇、乾旱、熱浪、強烈熱帶風暴)的頻率和強度發生變化。上述的評估研究能提供這些變化的資料。相比於長期平均變化(例如每月平均或每季平均),這些局部和短期變化實際上對社會經濟的影響更為重要。

七 結 語

為了保證第一工作小組的第四次評估報告觀點中立而具創新性,在撰寫報告的150位主要作者中,從未參與過往報告工作的佔四分之三,在最近十年內取得最後學位的達三分之一。由此可見,氣候變化研究的薪火已經傳給年輕一代科學家。

比起1970年麻省理工學院的研究^⑤,IPCC評估報告無論是廣度、深度都不可同日而語了,這是過去數十年來氣候科學成熟的見證,它的進步使得我們能夠對人類活動如何影響環境有了更深切的了解。現在,全球氣候變化問題已經進入很多國家政綱的前列。今年奧斯卡得獎紀錄片《絕望真相》(*An Inconvenient Truth*)十分矚目,票房收入高達五千萬美元,至今售出的光碟達一百五十萬片。這顯示了公眾對全球暖化問題的高度關注:人為氣候變化是人類在二十一世紀的關鍵問題,這一點已經不再受質疑了。

最後,我應該回到作為上述一切觀察和分析根據的IPCC文件來。它是全球氣候科學工作者多年合作的結晶,我們期盼它所開展的大量課題具有足夠挑戰與吸引力,能夠啟發更多新進科學家投身於這方面的研究工作。事實上,氣候科學是年輕人的世界:為了保證第一工作小組的第四次評估報告觀點中立而具創新性,在撰寫報告的150位主要作者中,從未參與過往報告工作的佔四分之三,在最近十年內取得最後學位的達三分之一。由此可見,氣候變化研究的薪火已經傳給年輕一代科學家。第五次評估報告將在2013年左右發表。我們很樂觀,到時候更年輕、受過更好訓練的新一代科學家將會站出來,為我們講述人類對地球氣候系統在其時和未來變化的最新評估。

顏兆輝 譯

註釋

①⑤ Report of the Study of Critical Environmental Problems, *Man's Impact on the Global Environment: Assessment and Recommendations for Action* (Cambridge, MA: The MIT Press, 1970).

② IPCC第一工作小組第四次評估報告全文,包括致決策者摘要、技術摘要及其他十一個獨立的章節,可於網站www.ipcc.ch瀏覽或下載。

③ 劉雅章:〈二十一世紀的環境危機:陽光與空氣〉,《二十一世紀》(香港中文大學·中國文化研究所),1994年2月號及4月號。

④ 劉雅章、陳方正:〈在大氣與海洋之間〉,《二十一世紀》,2005年2月號。

劉雅章 普林斯頓大學地球物理流體力學實驗室/美國國家海洋大氣總署高級研究員及氣候診斷研究組組長,並兼任普林斯頓大學大氣海洋學教授。