

Data courtesy of R.T. Wetherald, Geophysical Fluid Dynamics Laboratory

當溫室氣體濃度增加一倍後，由數值模擬推算出全球表面氣溫(上圖)及土壤含水量(下圖)的改變。不同深度的紅色及藍色依次代表溫度或含水量的上升及下降(見兩圖右方的顏色尺)。有關數據取自六月至八月期間，即北半球夏天、南半球冬天。

二十一世紀的環境危機： 陽光與空氣 II

• 劉雅章

陽光與空氣形成的第一個環境危機，是在南極洲春季上空的臭氧層的消失，或所謂「臭氧洞」的問題，在《二十一世紀》21期的本文前一部分已討論過。臭氧洞是由現代工業特殊產品引致的，它的發現富有戲劇性，令舉世震驚，並且促使科學界、工業界和各國政府在短期內共同尋求出合理和有效的解決辦法。臭氧洞充分顯示，現代科技可以在無意中對自然環境造成嚴重損害，但科學探討和分析同時亦可以解決很多人為的環境問題。

本文所要討論的第二個與陽光和空氣有關的環境危機，即「溫室效應」(greenhouse effect)，卻是完全不同類型的問題：理論上它是極其基本，無可爭議，而且與整個工業文明息息相關，不可分割的。但實際上它的量度、分析、預測卻極為複雜並附有相當高的不確定性。而且，目前也尚未有各方面可以共同接受的方案來解決這問題。與臭氧洞相比，溫室效應所牽涉的科技問題更為廣泛，更令人困擾。因此，它是對科學界、工業界和各國政府一個嚴峻得多的挑戰。

溫室效應的基本原理

在收支均衡的狀態下，地球吸納來自太陽的光能，也必須同時向外太空發放相等的輻射能，而這兩類輻射傳遞都是要通過大氣層的。太陽光的主要成分是波長0.4–0.7微米的光波，肉眼可觸覺到的彩虹光調（即紅、橙、黃、綠、藍、靛、紫等色）就是集結在這個波段的。從基本光學原理可以推算出，一個黑體(blackbody)發出輻射的有效波長與該物體的絕對溫度成反比，亦即溫度愈高，其波長就愈短。地球表面平均溫度約為15°C (288K)，而太陽表面溫度則高達6,000K。故此地球所發的輻射能大部分處於5–15微米的範圍，比太陽光的波段長出10–20倍。我們在以下就稱太陽光波為「短波」，而來自地球的輻射則稱之為「長波」，由於太陽輻射和地球輻射分別集結在不同的波段，而兩個波段又幾乎沒有任何重疊，因此這兩類輻射在大氣層的傳遞可以分開作個別處理。

地球大氣層的主要成分是氧氣和氮氣，但也包含許多其他微量氣體。由於後者有些具有特殊分子結構，所以能有效地吸收地球所發的長波，但卻允許來自太陽的短波直射到地球表面。這類氣體包括二氧化碳、甲烷、氧化亞氮、水蒸氣和各類前提及的氯氟碳化物(chlorofluorocarbons, 或CFCs)。這些微量氣體阻擋着地面向太空放射的長波，而且把部分吸收到的長波再照射回地面，因此對地球向太空輸放能量的過程形成障礙。這就好像在地球上蓋了一

圖1 溫室效應示意圖。



座溫室一樣，令較多的能量積聚在大氣下層，因而使地面升溫(圖1)。這就是「溫室效應」的由來。而產生這效應的氣體統稱「溫室氣體」。

證據確鑿

古氣象學家曾經搜集了不少觀察資料來驗證溫室效應的真確性。他們最近在南極洲的Vostok站抽取了一條深達二千米的冰柱。埋藏在這條冰柱不同深度的小氣泡仍遺存着不同年代氣候狀況的表徵。他們利用這些線索，推算出近十五萬年來當地氣溫以及溫室氣體的變化。結果顯示：不同年代的氣溫與溫室氣體濃度成正比，即溫室氣體愈高，地面氣候就愈暖，這個關係是與溫室效應相符的。發生在遠古時代的氣候變化當然並非人類活動造成的。這類週期長達數萬年的現象大致上可以用地球環繞太陽軌道的變化來解釋。

溫室效應的另一個啟示來自太陽系的不同行星。我們從各類太空探測儀錄到的資料得知，金星的氣候極度酷熱，其表面氣溫高達450C；而火星則冷得多，表溫約為-55C。這強烈的溫度差異並不單是由兩個星球與太陽的距離可以解釋的，其主要原因其實是金星和火星大氣層有不同的二氧化碳含量：金星的含量比地球高90倍，而火星則只有地球的0.7%左右。由此可見，溫室氣體過濃或過稀，會使得星球過熱或過冷，因而不適合動植物的生存和繁殖。唯有地球得天獨厚，其溫室效應令地球的溫度適中，並為萬物滋生提供了優良條件。換言之，適當程度的溫室效應對地球生態具有正面作用。

溫室氣體的增加

溫室氣體有些是天然的，如動植物的呼吸活動和新陳代謝都會產生二氧化碳，而地面和海面的蒸發作用是水蒸氣的主要來源。但人類的工農業活動也會加重大氣層的溫室氣體負荷。例如日常慣用的各類石化燃料(包括煤、汽油、石油氣、天然氣等)就會提高二氧化碳的濃度。另一方面，不少熱帶地區(尤其是巴西、印尼、泰國、象牙海岸和哥倫比亞等國)正在大規模砍伐原始森林，在燃燒林木的過程中把大量二氧化碳注入大氣層內。在90年代初期，人類的碳質消耗量約為每年70億公噸，其中來自石化燃料的佔七成，來自燃燒森林的佔三成。這些人為的二氧化碳估計有一半被海洋和陸地的生物吸收，另一半則存留在大氣層內。至於其他溫室氣體，人為的甲烷來自畜牧和天然氣的消耗，農用肥料則是人工氧化亞氮的主要來源，而正如前文說及，CFCs在製造噴霧器、冷劑和電路板溶液等工業品上有廣泛的應用。

現有觀測資料顯示(圖2)，在工業革命至二十世紀90年代期間，大氣層的

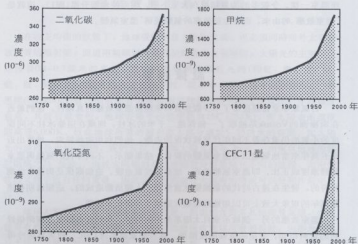


圖2 各類溫室氣體在過去兩個多世紀的增加。

Climate Change—The IPCC Scientific Assessment, 1990, p. vi.

二氧化碳濃度一共增加了25%，甲烷增加了一倍以上，而氧化亞氮則增加了10%左右。CFCs的負荷從六十年前幾近於零的水平至今，增加了差不多二千萬公噸。假若不實行積極管制，而任由人口和經濟增長率持續下去的話，估計在二十一世紀中葉，溫室氣體的總含量就會比現今水平增加一倍。

隨著溫室氣體的增加，可以預期溫室效應會愈加嚴重，因而令地球表面增溫。氣象學家搜集了百多年來世界各地的氣溫紀錄，證實全球平均地面氣溫在過去一個世紀以來大約增加了0.5C(圖3)。

一連串的問題

目前溫室效應的辯論並不在於有關的基本原理本身是否正確，因為這些原理都建立在科學界一致認同的物理定律上。不但溫室效應的理論基礎無可置疑，各種證據又進一步肯定這個效應的存在。人們現在爭論的其實是另一類問題。這類問題的關鍵在於：當溫室氣體比目前水平增加之後，氣候、生態系統、人類社會將會有甚麼反應？而我們怎樣為這些反應作出數量化的、細節上的預測？這些預測的準確度又如何？

舉個例說，倘若大氣真是隨著溫室效應加劇而增溫的話，溫度上升的幅度和速率究竟如何？地球上那些地區的升幅特別高或特別低？其他的氣候變數

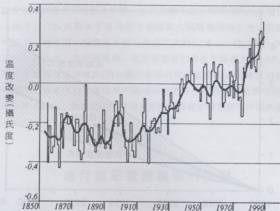


圖3 全球平均表面氣溫在過去一個多世紀的變化。粗線代表二十年期的滑動平均值。所有變化均以1951-1980年間的平均值為參考基準。

Ambio, 22 (1993), p. 379.

(如降水、雲量分佈、冰蓋、水平面高度等)相應的變化又是怎樣？氣候系統裏有那些物理過程會抵消或加速增溫的傾向？

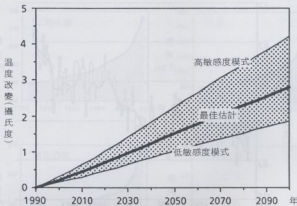
氣候變化的模擬和預測

為了進一步預測在下個世紀溫室氣體加倍時全球氣候的變化，科學家利用最先進的高速電腦進行很多數值模擬實驗，這些實驗的基礎就是大氣環流模式。氣象學家把大氣層已知的各種動力和物理過程(例如流體動力學、熱力學、大氣輻射、水氣循環等等)都盡可能納入模式內，然後再分析模式對不同外在條件(如溫室氣體的濃度)的反應，從而估計出溫室效應對各地區氣流、溫度和雨量的影響^①。

在1988年，聯合國的世界氣象組織(World Meteorological Organization)和環境計劃(Environmental Programme)共同成立了一個「研究氣候變遷的跨政府專責小組」(Intergovernmental Panel on Climate Change, 以下簡稱IPCC)。這個小組搜集了多個研究單位在溫室效應問題上的成果，並對這些結果作了詳盡比較^②。結論是：溫室氣體增加一倍，全球平均地面溫度預期會上升1.5C至4.5C之間。這個間達3C的不確定範圍，主要是由於我們對大氣層的運作還未有全面理解，所以環流模式在處理各類大氣機制時都需要做多種假設。另外一個因素是模式的空間精密度受到電腦機的速度限制：就算是最先進的全球模式，目前還未能夠分辨出平面空間尺度低於數百公里的大氣現象。

IPCC又曾考慮到二十一世紀全球的人口和經濟增長率、各種能源(包括石油、天然氣、核能、水力發電、太陽能等)的價格和消耗量，以及不同國家管

圖4 大氣環流模式所預測全球平均氣溫因溫室作用在未來110年的改變。粗線代表綜合不同模式結果後得出的「最佳估計」，另兩條幼線分別代表敏感度較高和較低的個別模式預算。模式實驗以1990年為起點。



1992 IPCC Supplement to Scientific Assessment of Climate Change, p. 19.

制各類廢氣的積極性，並且在這些問題上作出種種假設，從而為未來110年的人類經濟社會描繪出幾個不同「景象」(scenarios)。我們現在考慮其中一個取乎「中庸之道」的景象，其主要假設包括：在2100年世界人口為113億；1990-2025年間及2025-2100年間的經濟增長率依次為每年2.9%及2.3%；在2025年及2100年的碳質消耗量依次為每年120及200億公噸，而各國又遵從有關管制各類氣體(尤其是CFCs)的國際協定。

在上列條件下，預計溫室氣體將會在二十一世紀末期比現在的水平增加一倍，亦即其時的氣溫會比目前高出1.5C至4.5C(圖4)。正如前面所說，在無節制情況下，溫室氣體在二十一世紀中葉就會加倍。因此，種種干預措施其實只是將加倍的日期延遲半個世紀而已。

除了估計全球平均氣溫的改變之外，上面提及的數值實驗也嘗試模擬溫室效應對世界不同地區氣候的影響(見彩圖，頁68)。這些結果顯示，陸地上空升溫的幅度較海洋上空為高，其主要原因是海洋上的空氣受到較為恆定的海溫調節。此外，在冬季高緯度地區氣溫升幅亦較低緯度的為高。這個現象基本上是源於一個正面的反饋作用——升溫使得處於高緯度，而對太陽光反射率又較高的冰蓋溶解，因而暴露了反射率較低的土壤或海水。由於後者能比較有效地吸收太陽光能，遂導致當地升溫加劇(見彩圖上方南半球高緯度的溫度猛增)。

模式數據又表示當溫室氣體加倍後，內陸地區(包括中國部分地區)在夏季可能面臨較為乾旱的氣候(見彩圖下方塗上藍色的地區)。這個效果的解釋是升溫(尤其在夏天)增加了陸地表層的蒸發率，因而使得泥土水分儲藏量下降。另一個因素是大氣層的增溫可能會改變大範圍的環流狀況，尤其是使一些帶雨的天氣系統改道，從而令到內陸降水量減低。

溫度效應對海洋亦有頗大影響。基於熱脹冷縮的原理和冰川溶解後大量水分注入海洋，可以預期水平線的高度會隨着大氣層增溫而上升。觀察結果顯示，在過去一百年間，地表水平線已升高了大約0.1米。一些大氣—海洋的耦合模式估計在二十一世紀的後期，溫室效應會引致水平線再上升0.5至1米。這會使得更多沿海及低窪地區(例如滿佈香港的填海區)受到海水淹沒的威脅。由於海洋環流主要受制於大氣低層的風場及透過海—氣界面的能量和水量傳送，上述耦合模式顯示：溫室效應引發的大氣變遷亦會影響整個海洋環流系統的運作③。

應付溫室效應挑戰的困難

(甲) 從科技到政治和經濟

當我們考慮採取何種措施來應付關乎溫室效應的環境問題時，有幾個因素是需要考慮的④：

第一個因素是目前我們對氣候系統認識有限，因此模擬實驗的一些結果還有頗高度的不確定性。換而言之，我們對溫室效應問題的把握遠不及前文介紹的臭氧洞問題。因此諸如「全球增溫全屬人為」一類論點對制定政策者和普羅大眾來說，仍然缺乏說服力。不少人認為現在就實行積極干預未免操之過急，倒不如等待科學界對這個問題作出較確實的定論之後再作打算。但亦有人認為，我們愈拖延對這危機作出反應，就愈加泥足深陷，最終會對大自然造成永遠無法彌補的損害。

第二個因素是採取任何對應措施都要付出經濟和政治代價。例如對於二氧化碳生產量的控制所涉及的層面就極為廣泛。相對來說，控制臭氧洞的根源(CFCs)就比較簡單，因為後者的年產值只約為二十億美元。因應溫室效應問題而作出的策略性措施必然影響到全球經濟發展、跨國貿易關係、各種能源的分配、人類的生活方式，等等。加上溫室效應是一個長期性問題，它最嚴重的後果要等到下一世紀才會出現，在當前就要求政府和工業界對這個似乎是遙遙無期的環境問題作出影響深遠的對應策略是極為困難的。

第三個因素是我們仍未全面了解各類干預環境運作的措施可能帶來的後果。各個環境生態系統之間的關係是非常複雜的，而這些系統又同時與人類社會產生各種雙向互動，當我們嘗試矯正大氣環境任何一個單元時，其他的附屬系統都有可能作出連鎖性反應，後者導致的問題甚至會比原來要解決的更為嚴重。

總括來說，如何面對這個環境危機已經不再是一個單純的自然科學問題，而是牽涉到社會學、經濟學和政治學等各種社會科學的龐大問題了。

(乙) 初步反應

目前人類社會對溫室效應可能作出的反應大致可分為三大類：第一，管制各種溫室氣體的生產量；第二，為適應未來可能發生的氣候變遷作好準備；第三，積極進行一些能夠抵消這些變遷的環境工程。

基於前述各種原因，管制溫室氣體要比管制CFCs複雜很多。在1992年巴西里約熱內盧舉行的聯合國環境及發展會議，參與國已經同意在2000年以後將溫室氣體的發放量保持在1990年的水平。而溫室氣體發放量高佔全世界四分之一的美國，在最近亦制訂了一連串措施，務求符合里約熱內盧的協定。這些措施包括提高汽車引擎及各類電器的效率、改善居住樓房的絕熱功能、植樹、推廣公共交通、發展水力發電，以及管制各類溫室氣體等。但這些規定充其量只能提供一些原則性的指標，以冀工商業界用自願形式依隨，而並沒有強制施行。

在適應未來可能發生的氣候變遷這一環，目前確實做得到的也不多，大部分有關工作都還滯留在學習和研究層面：例如農業家正在培養一些在地球增溫後比較容易生存和繁殖的農作物品種，而許多大規模水利、交通和土地發展工程亦開始顧慮到溫室效應可能帶來的各種環境變遷。

最後，也有人提議積極用現有或未來可發展的科技試圖扭轉地球增溫的趨勢。例如設法令海洋生物吸納更多的溫室氣體（見本期科技訊息欄的報導），施行大規模的植樹運動以求吸收二氧化碳等等。由於這類措施都需要動用龐大資源，其影響範圍往往跨越國界，又加上這些行動的有效性及反面的副作用未能確定，因此這些對應策略目前仍然都處於討論和研究階段而已。

對科技文明的反思

從陽光與空氣所產生的兩個嚴重環境危機我們得到一個基本啟示，那就是科技文明可以為人類帶來種種前所不能夢想的福利，但同時也會產生意料不到的大問題，這些問題的解決是需要跨越兩種傳統界限才有可能成功的。第一類界限是學科之間的界限：大氣層不單單是氣象學家或物理學家的領域，也同樣是化學家、流體力學家、生物和生態學家、海洋學家，甚至教育、經濟、社會學家和工業家的領域。因為它覆蓋太廣，影響太大了，除非各行各業的人材都動員起來，共同合作，否則將難以透徹了解它，更不要說扭轉它變動的大趨勢了。

第二類必須打破的，是地域和政治的界限。大氣層是影響全人類，同時也受到全人類影響的。所以，無論從資源分配或管制效果的角度看來，大氣問題絕不是個別政府或地區所能單獨解決，而必須由全人類齊心協力，共同合作，才有可能真正解決。也許大氣的危機，正好提供一個機會，促使不同歷史與文

化背景，以及不同政治與經濟體系的社會互相對話、合作，產生共同的「環境語言」和「環境文化」，進而群策群力，以解決全人類共同面對的環境問題吧？

鳴謝：本文內容大意取自作者於1993年底以「楊振寧訪問學人」身份在香港中文大學發表的其中兩個演講，在撰寫和整理過程中，承蒙陳方正博士給予多方面的幫助和鼓勵，特此致謝。

註釋

- ① 有關大氣環流模式的內涵及其對溫室效應的模擬可參考Kevin E. Trenberth (ed.): *Climate System Modeling* (Cambridge University Press, 1992)及John F.B. Mitchell: "The 'Greenhouse Effect' and Climate Change", *Reviews of Geophysics*, vol. 27 (1989), pp. 115-39.
- ② IPCC的報告先後發表在J.T. Houghton, G.J. Jenkins and J.J. Ephraums (eds.): *Climate Change. The IPCC Scientific Assessment* (Cambridge University Press, 1990)及J.T. Houghton, B.A. Callander and S.K. Varney (eds.): *Climate Change 1992. The Supplementary Report to the IPCC Scientific Assessment* (Cambridge University Press, 1992).
- ③ 有關溫室效應對海洋的影響可參考S. Manabe and R.J. Stouffer: "Century-scale Effects of Increased Atmospheric CO₂ on The Ocean-atmosphere System", *Nature*, vol. 364 (1993), pp. 215-18.
- ④ 以下的部分觀點在Stephen H. Schneider: "The Greenhouse Effect: Science and Policy", *Science*, vol. 243 (1989), pp. 771-81有較詳盡的論述。

劉雅章 香港中文大學理學士(1974)，主修物理，隨赴華盛頓大學深造，於1978年獲大氣科學博士學位。其後受聘於普林斯頓大學地質流體動力實驗室，現為該室高級研究員，並兼任普大大氣與海洋學副教授。劉教授對大氣科學有廣泛研究，尤其在大氣環流分析問題上有重要貢獻，曾於各重要學術刊物發表論文50多篇，且先後獲多個美國學術團體獎項。