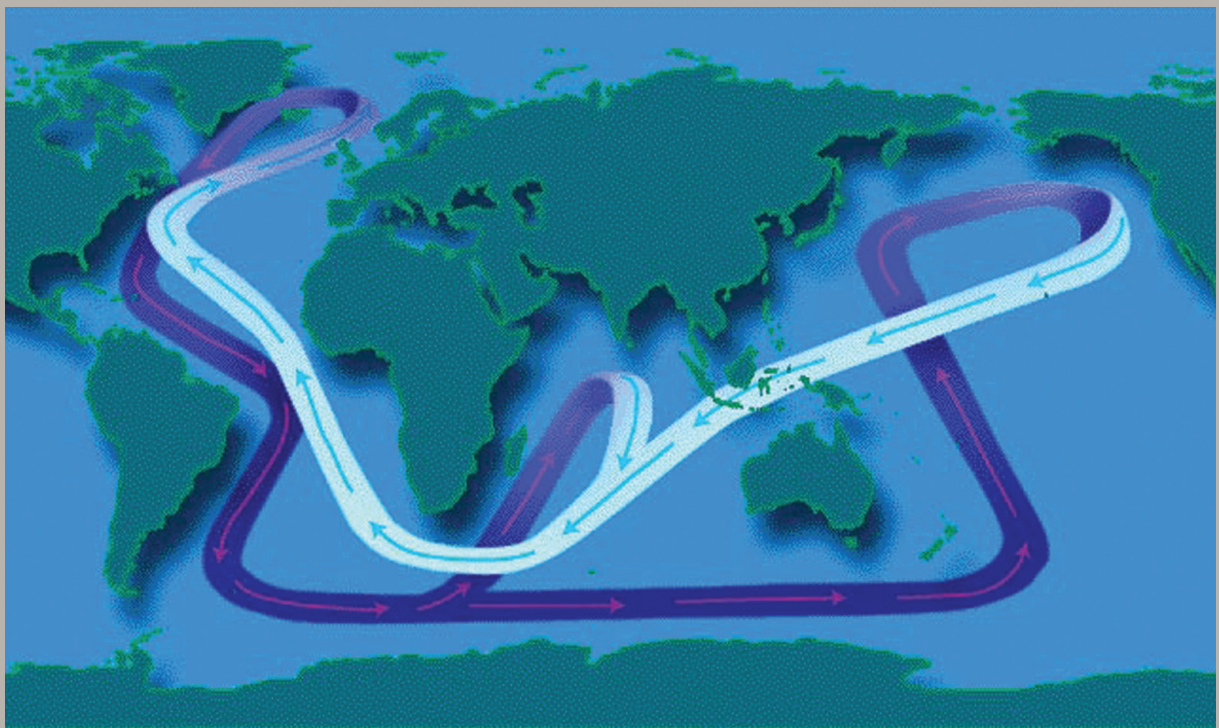


Courtesy of the U.S. National Aeronautics and Space Administration.

A 2001年5月2日北大西洋海面溫度的衛星照片：紅、綠、藍分別代表溫暖、中和及寒冷水溫；左邊黑影部分是美國東岸；雲層所遮蔽部份以白色表示。自左下角往東北方向延伸的暖水帶顯示強大的灣流 (Gulf Stream) 驅使高溫海水從低緯流向高緯地區。其細節表明與灣流相連的各類渦旋極端複雜。



Courtesy of the U.S. National Aeronautics and Space Administration.

B 全球海洋輸送帶示意圖：白帶表示大洋表層的暖流，藍帶表示底層的冷流。此圖顯示溫鹽環流在北大西洋沉降到底層，而這環流圈的表層和底層都與印度洋及太平洋相連接；輸送帶在印度洋及太平洋的詳細結構在目前尚未完全確定。

在大氣與海洋之間

● 劉雅章、陳方正

北冥有魚，其名為鯢，鯢之大，不知其幾千里也。化而為鳥，其名為鵬，鵬之背，不知其幾千里也。怒而飛，其翼若垂天之雲。是鳥也，海運，則將徙於南冥，南冥者，天池也……鵬之徙於南冥也，水擊三千里，扶搖而上者九萬里，去以六月息者也。

——《莊子·逍遙遊》

人類所感受於大自然最直接，最強烈，而又最變化多端者，莫過於大氣現象：舉凡風雷雨電、冰雪霜霰、冷熱寒暑，都是從覆蓋地球的大氣運動和變化所生。大氣現象對人類活動的影響是如此重要和深遠，整個世界都致力於建立龐大和周密的大氣觀測網絡，以為短期氣象預報和長期氣候變遷提供數據，所以，在地球環境科學之中，氣象學所得資源較多，發展較快，那是很自然的。當然，大氣並不是個封閉系統：例如，大家都知道，它的溫度和濕度就深受其下陸地或者海洋的影響；又例如，人類大量利用化石燃料所產生的「溫室效應」問題，多年來也已經為一般人所理解和注意，甚至成為大眾熟知的國際問題。然而，直到最近才為學者了解的是：大氣、海洋和「溫室氣體」三者之間的互動，實在比我們原來認識的要複雜和微妙得多。在這裏我們所要報告的，便是這些新發現的概況。

在討論這些新發現之前，我們首先得記住：海洋是個龐然大物，它佔據的面積和熱容量超過地表，密度、質量、比熱、熱容量，變化時間尺度等等則遠

* 在撰寫本文的過程中，作者得到劉擎博士、普林斯頓的諸位專家學者、及《二十一世紀》編輯室同寅的多方鼓勵和協助，謹此致謝。

遠超出大氣。例如，海洋覆蓋地球表面積71%，平均深度達3,800米，陸地平均海拔只有840米；海洋佔據了地表水總量的97%，陸地系統佔比例不到1%，大氣僅佔0.0009%；海水密度約為海面大氣密度的800倍，海水總質量約為大氣的280倍，其定壓比熱是空氣四倍以上。由於海水熱容量巨大，海洋所存儲熱量的季節變化幅度達到地表的10-100倍，洋流承擔了從赤道到極地之間一半的熱能傳輸，以平衡熱帶與高緯度之間不同的輻射能淨吸收。深海底部海水替換成新水質需要幾個世紀甚至上千年（這稱為留駐時間），然而在海拔約十公里以下的大氣最低層，相應時間尺度只有幾天至一兩年。海洋生命多樣性(biodiversity)極高，它包含多達二十萬到一千萬物種，海洋生物是陸地生物「門」類總量的兩倍（「門」[phylum]是生物分類層次，其級別僅在「界」[kingdom]之下）。全世界年海洋捕魚量達到八千萬公噸，提供了人類所消耗動物蛋白質的16%，這百分比在東南亞居民更達28%。另一方面，海洋在受到颶風、火山、地震等因素激發而產生的破壞力量之龐大與可怕，則更由於去年12月26日蘇門答臘海底地震所引發的印度洋周邊地區災難性海嘯，而顯露無遺，它在世人心中所造成的創傷，所投下的陰影，恐怕長期也難以消除。

其次，海洋和大氣之間的互動其實是非常緊密的。這不僅限於水通過蒸發和降雨而在兩者之間循環，或者由於兩者溫度差異而產生的熱能傳輸。除此之外，兩者的互動作用還有動量的耦合，即風影響洋流強度和方向；非線性的互動，例如風生海浪，浪的大小又改變了海洋和大氣在接觸介面上能量與動量的交換強度；又或者海洋吸收大氣中過量的二氧化碳，從而影響溫室效應，並連帶影響溫度等等。更需要注意的是，大氣和海洋之間的互動往往形成「正反饋」，也就是說一方的變化或者「信號」會通過互動而放大、加強，這就會導致複雜和難以簡單分析或者預測的混沌(chaotic)現象出現。

因此，無論以海洋或者大氣為獨立系統的研究都有極大局限。回想本文作者之一(劉雅章)當年攻讀大氣科學的時候，居然從未有幸研修任何海洋學課程，那實在是很奇怪的事情。當然，時代已經改變了，這兩門學科的進步以及實際需要已經使得兩方面的合作越來越密切，甚至，很自然的，這已經導致兩個領域出現合併的趨勢，所以許多相關的大學課程已經改名為「大氣與海洋科學」、「地球科學」或者「地球系統科學」了。

十年前，本欄討論過工業文明所產生各種微量氣體(最主要的是二氧化碳和臭氧)對地球環境的影響，數年前又詳細介紹過海洋—大氣互動現象中最顯著的例子，即熱帶太平洋地區所發生的「厄爾尼諾—南方濤動」(El Niño-Southern Oscillation, 簡稱ENSO)^①。本文所要報導的，便是近年來大氣—海洋系統研究的三個新發現，它們充分顯示了這個龐大系統中不同部分的耦合之緊密，以及任何一個基本變化所會引起的影響之複雜與深遠。在人類活動已經成為地球環境變化基本因素之一的今天，這些發現的重要性是值得我們認真注意和思考的。

一 二氧化碳失蹤之謎

如所周知，工業革命對環境最根本和長遠的影響就是大大增加了大氣中的所謂「溫室氣體」，那主要就是由於化石燃料 (fossil fuel) 的應用、水泥製造等活動而釋放的二氧化碳 (CO₂)。它在大氣中所佔的比例雖然極微，卻能夠像溫室的玻璃或者透明塑料那樣，阻止地表輻射向外逃逸，從而導致全球變暖，所以它對氣候有關鍵性影響——我們推測，它可能導致了地球在近兩個世紀一半以上的升溫。因此，毫不奇怪，大氣二氧化碳含量變化的研究和測度成為了最受關注的問題。

古氣象學家在南極東方站 (Vostok) 鑽取了深達二千米的冰柱，他們根據研究這冰柱薄切片中的小氣泡發現，在工業時代前夕即十九世紀之初，大氣中二氧化碳的濃度大約只有280 ppm (parts per million, 即百萬分率, 280 ppm = 0.028%)；從1958年開始，夏威夷莫那勞亞 (Mauna Loa) 火山峰附近的氣象台則對大氣中這一微量氣體直接作定期檢測，發現到了1994年，其濃度比之1800年已經增加28.2%，即達到359 ppm，這相當於大氣所含碳總量實際增加了165 Pg C (1 Pg = 10¹⁵克，也就是十億公噸，1 Pg C指十億公噸的碳，這是間接衡量二氧化碳總量的單位)。但奇怪的是：在1800-1994年間，人為的二氧化碳總排放量卻有244 Pg C之多。換而言之，人類活動所產生的，亦即所謂「人致」(anthropogenic) 二氧化碳，大約只有三分之二停留在大氣中。那麼，其餘的三分之一跑到哪裏去了呢？

這麼大量氣體的儲存庫只可能有兩處——陸地和海洋。陸地表面太複雜了，它對碳的吸收是難以精確探測的，但海洋則比較簡單，所以，從1990年代開始，在一個大型和長期國際合作計劃推動之下，海洋科學工作者已經朝這個方向全面動員起來。他們的研究包括九十五次海洋巡航所彙集的近一萬次勘探資料，以及五年多時間的資料核查和分析。幾個月前，這項雄心勃勃的研究專案概要性報告發表^②，其主要發現的意義也得到了闡釋^③：我們終於可以肯定，人致二氧化碳的確有很大部分是被浩瀚的海洋吸收掉了！

當然，海洋並不是個固定的容器，它本身的多種生物和化學過程都可能影響海水的二氧化碳容量，所以我們得先用種種精密方法把這些影響排除，然後推斷海水中直接從大氣中的二氧化碳增量所構成的部分到底有多少。由此而得的結論是：在1800-1994將近兩個世紀間，在全球海洋中的人致二氧化碳增量為118 Pg C。奇怪的是，這大約是上文所提到的人致二氧化碳排放總量244 Pg C的一半，而並非我們預期的三分之一。

顯然，這兩者的差額只能用陸地系統中儲存的二氧化碳來解釋。倘若將全球氣候系統(大氣、海洋和陸地)視為整體，那麼它必須處於平衡狀態，所以過去二百年間陸地碳含量變化應為244(總排放量)-165(大氣含量)-118(海洋含量)=-39 Pg C，也就是說，陸地不但沒有儲藏二氧化碳，反而是減少了39 Pg C。這只能來源於在工業過程以外，主要是土地使用的變遷，例如大規模森林砍伐和燃燒。根據粗略估計，這一人為來源在工業時代導致了100-180 Pg C的額外排放。在扣除輸入大氣和海洋系統的39 Pg C之後，我們可估計土地利用產生的

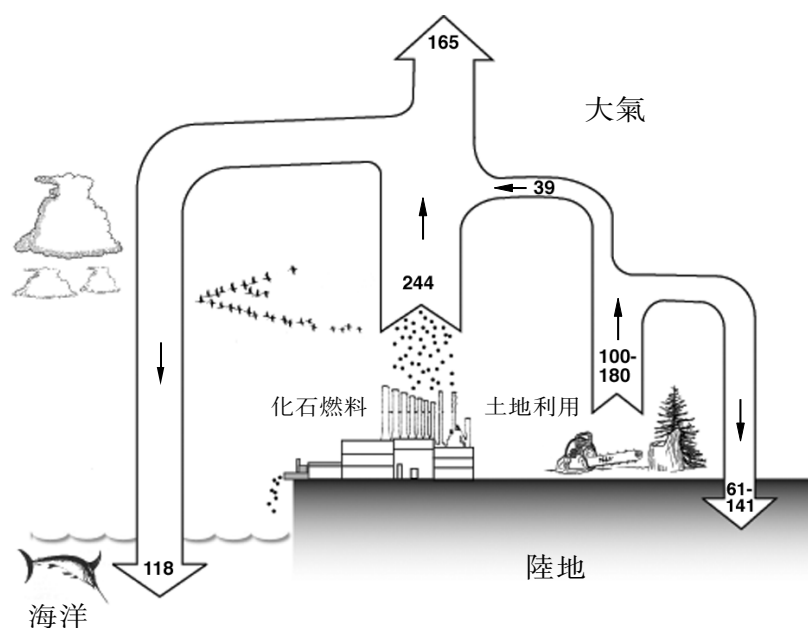


圖1 大氣—海洋—陸地系統中人為排放二氧化碳的來源／儲存及路徑示意圖。單位：Pg C (10^{15} 克的碳)。注意海洋作為一個儲存庫接受存放人致二氧化碳。估算依據C. L. Sabine等人的研究，參考註②。

二氧化碳有61-141 Pg C歸還到陸地生物圈。這整個的人致二氧化碳排放循環可以用圖1來概括。從之可見，海洋是人致二氧化碳的最龐大儲存庫：倘若沒有這個儲存庫，那麼可以推算，今日大氣中二氧化碳的濃度就會爬升到435 ppm，而不是實際的380 ppm，而地球升溫的問題也會比目前嚴重得多。

事實上，海洋吸收二氧化碳是個非常緩慢的動態過程。據估計，目前海洋對二氧化碳的吸收能力僅僅達到其長期潛能的三分之一，而大約有90%的人致二氧化碳將最終可以為海洋吸收，但這可能是幾千年之後的事情了④。那麼，為甚麼這儲存庫的大門不能開得大一點呢？

關鍵在於，大氣中的二氧化碳必須先通過空氣和海水的界面而溶解在海洋表層，然後才能夠從表層滲透進入其內部和深層，而這些過程的速率決定於許多不同因素。根據前述海洋勘測資料，和由是而繪製的人致二氧化碳在海洋中的三維分布圖⑤，我們可以看到：海洋中的人致二氧化碳大部分存儲於表層：事實上，它大約有一半是在深度不超過四百米的海水中。但即使海表層的含量也還有顯著橫向變化，即在熱帶海域較低，在溫帶海域較高。熱帶海域含量低有兩個原因：(1) 很多近赤道地區都出現海水上湧 (upwelling) 的現象；(2) 熱帶海洋表層與內部的密度之間存在急劇增加的梯度 (主要由於高溫和大量降雨造成表層密度降低)，兩者都阻礙二氧化碳往下滲透，從而限制了二氧化碳在那些水域的整體含量。另一方面，在北大西洋和部分南方海洋等溫帶海域，卻可以在海水表層觀測到高濃度的二氧化碳，這主要是因為此區表層海水呈現較高密度和鹽分含量 (其原因見下文第三節)，由是其自身浮力降低，其在垂直方的混合增

加，這就為二氧化碳提供了有效滲透到更深層海域的途徑，並且提高了該區海水的二氧化碳整體含量。

總而言之，相當大部分大氣中的人致二氧化碳是被海洋吸收了，吸收速率取決於海洋本身的結構(即溫度和含鹽度的分布)以及運動(包括垂直的湧流和水平的洋流)，而吸收量目前還遠遠未曾達到飽和。這樣，假如二氧化碳的排放得以立時受到控制，從數千年的時間尺度來看，我們好像大可不必為溫室問題而過份擔憂了。然而不然，除了產生直接的溫室效應以外，大氣中的二氧化碳還有其他更間接、微妙的作用，而且其至終影響可能是意想不到的巨大。

二 撒野的孩子：暖氣候中的厄爾尼諾

所謂「厄爾尼諾」(*El Niño*)是指赤道太平洋兩側的二至七年高溫(厄爾尼諾)和低溫(拉尼娜[*La Niña*])的交替循環現象，其間整個熱帶太平洋流域近海面三百米以內的溫度和洋流都會呈現出明顯的結構性變化。厄爾尼諾現象和拉尼娜現象(西班牙語，意思分別為「小男孩」和「小女孩」)是由於海洋與大氣之間強烈耦合所致：伴隨着厄爾尼諾海洋變化，南太平洋上空在東西之間會同時形成海面氣壓的拉鋸狀況，這稱為「南方濤動」(*Southern Oscillation*)。鑑於兩者之間的密切關係，所以在1980年代初我們就開始用ENSO來指稱這一系列現象，這可以說是海洋與大氣科學結合的象徵。

ENSO對全球天氣以及人類生活是影響極大的：例如，1982-83年間的強ENSO造成了130億美元的經濟損失，使至少二千人死於洪水、乾旱、山火、雪暴，以及熱帶旋風等各種天災的襲擊^⑥。所以，一個非常自然而緊迫的問題就是：這到底和大氣中溫室氣體的增加有沒有關係？特別值得注意的是：熱ENSO現象在最近三十年內出現的頻率比過去一百年中要高，其中有兩次(1982-83年和1997-98年)是二十世紀觀察記錄中最強烈的；更奇怪的是，類似厄爾尼諾的狀況在1990-95年間持續出現(見圖2)。統計資料顯示^⑦，就歷史標準而言，這些現象都是反常的，大約每二十個世紀才會出現一次。由於最近ENSO的頻率和類型實屬罕見，人們有理由推測：它不是氣候系統的自然變化，而是與某些外在因素(比如由溫室氣體導致的氣候變暖)有關的。此外，我們還得注意：ENSO會導致地區性乾旱和頻繁的森林大火(1997年厄爾尼諾在印尼引起的火災是顯著的例子)，從而釋放大量二氧化碳到大氣中，所以它和溫室氣體的排放是具有正反饋耦合的。

然而，僅僅探究統計性關聯是不夠的。如果認為溫室氣體導致的氣候變化的確是反常ENSO現象的原因，那麼就必須通過氣候系統的數值模式來驗證這個假設。在模式中，除了要輸入海岸、山川、地形等地理數據以外，諸如風、雲、雨、洋流、日照、輻射、水文、紊流混合、大氣微量成分、生態系統，以至大氣—海洋—陸地的耦合等等因素，都要運用物理基本規律加以模擬和表達。以這些數值模擬工具進行的大氣系統實驗通常要積分成百上千個「模式年」。例如安裝在

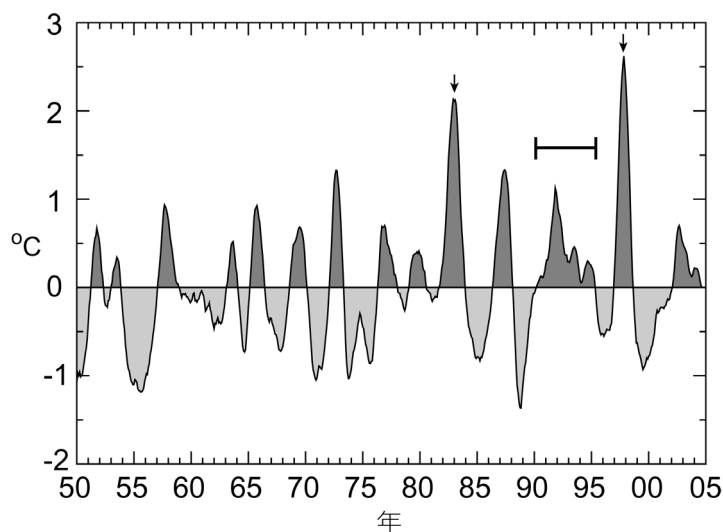


圖2 1950年至今赤道太平洋中部海面溫度的時間演化。資料顯示的溫度是與長期氣候平均值的差異。強烈的正負值分別表示熱厄爾尼諾現象和冷拉尼娜現象的發生。注意，1970年代中期以後厄爾尼諾現象更為頻繁出現，尤其是在1982-83年和1997-98年兩個顯著時段（以箭頭特別標出），以及1990-95年間的持續高溫時期（以水平線特別標出）。

資料來源：美國國家海洋和大氣局。

日本橫濱「地球模擬儀」的電腦——直到最近仍被列為世界上速度最快的電腦（持續速率為每秒35兆次浮點運算）——就是專門用於天氣與氣候數值實驗的。

迄今為止，一些已完成的實驗顯示^⑧，倘若在模式計算中注入更多溫室氣體到大氣中，就的確會導致沿赤道太平洋地區海面溫度的變化，而且這變化在東西方向有所不同，從而造成了海溫梯度，影響該區的風和洋流，以及ENSO的形成和演化。有些研究顯示，隨着溫室氣體進一步增加，ENSO可能變得更加頻繁和強烈；而且，與ENSO相關的大氣和海洋變化的高峰期可能從當今的北半球冬季（12月至2月間）往前移到夏秋之間。然而，各種不同的模式實驗所得到的結果卻是不一樣，甚至是相反的。也就是說，這些模擬實驗目前還未曾進步到成熟和可靠的階段，我們所能夠推測的，只是溫室氣體和ENSO可能有些關係而已，但關係到底如何，在現時還無法確定。然而，雖然溫室氣體問題對於ENSO和赤道洋流的影響還不是那麼清楚，它對大西洋的洋流以及歐洲氣候的影響就戲劇性得多，甚至已經在大眾傳媒上引起轟動效應了。這是我們在下一節要討論的問題。

三 冰原下的秘密：新仙女木會否重臨？

甲 緩慢和突發氣候變遷

厄爾尼諾是短暫的準週期性氣候變化，它的效果雖然嚴重，卻還在人類社會所能夠應付的範圍以內，對人類文化、文明的進程說不上有決定性影響。但

是，古代出現過多趟的冰川時期可就不一樣了：當時數百米厚的冰原覆蓋了歐亞和北美洲大陸的大部分，氣候非常寒冷。即使以今日的科技文明而言，倘若遭遇這樣嚴峻的氣候，恐怕也將應付維艱，絕大多數人目前的生活方式都必須改變。那麼，到底是甚麼造成那麼可怕的冰川時期？它還會再來嗎？

要回答這問題我們先得了解，地球表面溫度決定於它的輻射能耗失 (radiative energy loss) 與能量來源這兩者之間的平衡，而能量來源只有太陽 (比起太陽能，地球內部逐漸冷卻所釋放的熱能是微不足道的)，所以決定大氣系統狀況最根本的，就是太陽能的輸入。由於像地球軌道的偏心率、地球自旋軸的傾斜、歲差等等天文變化具有二萬到十萬年之間的週期，所以太陽能和氣候的根本狀況也會顯示出相應的週期性變化。這解釋地球古氣候中冰期 (glacial) 和間冰期 (interglacial) 交替出現現象的理論，最先是南斯拉夫地質學家米蘭科維奇 (Milutin Milankovitch) 在二十世紀的20、30年代提出。的確，從分析深海沉澱層的同位素所得到的古氣候記錄，就顯明冰川期出現的間隔大約為十萬年。至於對氣候有決定性影響的其他非天文因素，例如大陸漂移和大氣成分的自然改變等等，時間尺度更長，大約為一億年。從此看來，氣候系統的任何重大轉變都應該以非常緩慢的節奏進行。

然而，並非所有巨大氣候變遷都來得這樣緩慢：最近某些氣候變化的時間尺度比上面提到的短得多：例如所謂「小冰川期」只持續了幾個世紀 (1430-1850)；1930年代美國中部的「塵暴」(Dust Bowl) 時期只有大約十年，其特徵是持續的乾旱和普遍的溫度上升；前面提到始於1970年代頻繁而強烈的厄爾尼諾現象體系則有三十年之久，這些轉變都發生得相當突然。不過，最驚人和壯觀的，則是12,800-11,600年前的所謂「新仙女木」(Younger Dryas, 即YD) 時期，當時總體上正在變暖的趨勢被一個突如其來的1,200年寒冷期打斷，格陵蘭的溫度在這時期之始於十至二十年間驟降7℃，在此期之末則於數十年間陡升大約10℃ (圖3B)，這數量級遠高出於「小冰川期」(大約1℃) 或者「塵暴」時期 (小於1℃)。

上述溫度變化的資料得自位於格陵蘭高原中部海拔三千米的頂峰站 (Summit Station) 記錄，由對冰核薄切片進行同位素分析而得出。圖3A顯示了推算所得過去五萬年的溫度變化，從中可見，格陵蘭的溫度從二萬年之前「寒冷時期」(這就是距今最近的所謂「冰盛期」[Glacial Maximum]) 的大約-45℃逐漸升高到「現代時期」(一萬年前至今) 的大約-30℃。而絕對意想不到的：在過去五萬年間，新仙女木事件全然不是獨特的，而且，具有同等幅度和突發性的類似事件曾經在更久遠的過去多次發生，「新仙女木」只不過是這些突發性氣候驟變最晚近的一次。結合從格陵蘭以外地區的其他古氣候記錄證據 (包括最近在南京附近葫蘆洞內鐘乳石的分析) 還可以發現，在12,000年前的寒冷期，世界許多地區的氣候都曾經發生重大變遷。所以，和我們的預期不一樣，歷史上曾經多次出現巨大溫度突變。這些劇烈的突變顯然和地球軌道或者地殼板塊運動並沒有關係，所以都不可能用米蘭科維奇理論解釋。那麼，它們又是如何形成的呢？

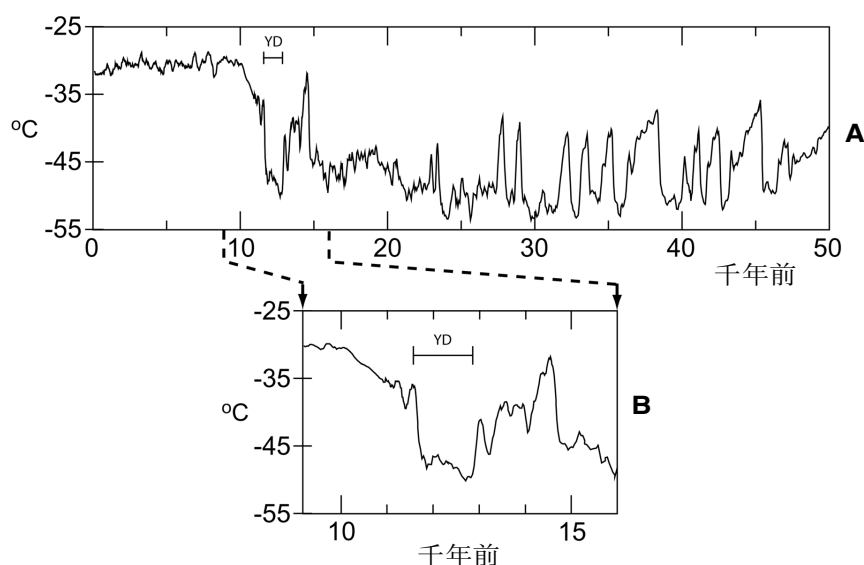


圖3 圖A顯示了格陵蘭島中部在50,000年前迄今的溫度變化。在放大的插圖B中，延伸的時間軸更為詳細地顯示了距今16,000年到9,000年間的溫度變化。注意在距今12,800年至11,600年間，YD事件所引發的驟然降溫現象(在上下兩個坐標中都用線段「YD」表示)。時間沿着橫坐標自右向左推進。圖片來源：R. B. Alley對冰核測算的分析(見註⑨)。

事實上，突發性氣候變遷對生態與社會可能造成災難性影響，甚至對民族乃至全人類的命運造成打擊。例如，有迹象表明，西元750-900年瑪雅文化(在今日墨西哥的尤卡坦半島附近)的突然中斷，以及西元前2200年美索不達米亞北部的雨水灌溉農業文明(在今日敘利亞附近)的消亡，都是由氣候發生急劇乾旱所致。從這個角度看來，最近的電影《明日之後》(*The Day After Tomorrow*)以新仙女木事件為題材大加渲染，也就不足為奇了。無論如何，這問題的重要性顯然不容忽視，所以已經引起美國國家研究委員會(National Research Council)的重視和討論，由此而產生的報告，可以說是了解這些現象的證據和物理機制的最佳綜述⑨。

氣候發生突變的最基本機制是：主宰氣候的大氣和海洋是個非線性系統，它具有多種不同的動態平衡狀態，其中有穩定的，系統狀態不會受輕微擾動影響；有不穩定的，即使細微擾動也會改變它。但即使是穩定狀態，由於所謂「觸發」機制的的作用，在特殊擾動的幅度超過某些「門檻」值之後，就會出現狀態轉移。地質記錄顯示，地球在其歷史上就經歷過多種獨特而穩定的氣候狀態：從大約六億年前大部分被冰封的「雪球狀態」(Snowball Earth)，到六千五百至五千五百萬年前南北兩極冰蓋都消失的「暖室狀態」(Hot House)是其中最極端的例子。

乙 龐大的熱能傳輸帶：溫鹽環流

現在，讓我們回到YD事件來。關鍵問題是：和它有直接關係的，到底是龐大氣候系統之中的哪一個子系統？有不少迹象顯示，它就是北大西洋的「溫鹽

環流」(Thermohaline Circulation, 見圖4)。這基本上是個由南北方向 (meridional) 及垂直方向 (vertical) 洋流構成的循環圈。以東西向平均的觀點來說, 這就是從美洲東岸至非洲、歐洲西岸之間深約數百米的表層海水整體向北流動, 在其北部邊緣 (從拉布拉多海、格陵蘭以至挪威附近) 沉降到海的底層, 然後沿海底向南流動, 由是維持了這個環流的連續性。驅動和決定這環流的基本力量包括大洋在不同緯度所吸收太陽能的差異和水份蒸發差

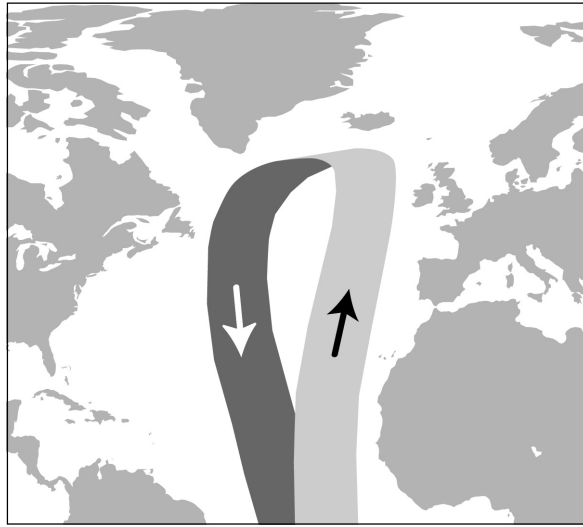


圖4 北大西洋海域溫鹽環流示意圖。淺色的分支表示近海面的海水向北的傳送 (注意黑色箭頭的方向)。深色的分支表示近海底的海水向南的傳送 (注意白色箭頭的方向)。沉降運動發生在拉布拉多海、格陵蘭海和挪威海附近, 環流的結構顯示北大西洋海域東西向平均的狀態。

異、由地球自旋所產生的科里奧利力 (Coriolis force)、信風的帶動等等, 但它在北方的沉降, 則主要是由於該區表層的海水密度特別高所致。

海水的含鹽量和溫度決定了其密度, 在北大西洋鹽度 (salinity) 對密度影響特別大, 即鹽度越高, 密度越大。在乾燥和陽光充沛的亞熱帶地區 (北緯15-35度), 海水蒸發作用強烈, 因此溫度、鹽度和密度都很高, 這海水在大西洋表層向北極方向流動, 在此過程中其鹽度由於繼續蒸發而進一步提高, 溫度則逐步下降, 所以當到達北緯60度左右時, 其密度顯著增高, 自身浮力則減至很低, 從而達到往下沉降的臨界點。在這個緯度範圍內, 正如本文第一節所提到的那樣, 下沉運動的蔓延與當地水域的人致二氧化碳向深層滲透是一致的。然後, 下沉水流在海底重新啟程, 沿着環流圈返回熱帶海域的底層。這樣, 溫鹽環流將暖水沿着海面向北運送, 而將相對較冷的水沿着海底送回南方, 在北大西洋海域形成了傳送熱能的龐大「輸送帶」(Conveyor Belt), 它導致了西歐的氣候相對溫和。這北向的熱量傳輸有相當部分是由個別洋流系統完成, 例如, 起源於墨西哥—加勒比海灣區域的灣流 (Gulf Stream, 見彩頁圖A), 在表層向北流動可以伸延至挪威海域。此外, 溫鹽環流也與其他海域的環流圈相連接, 共同構成龐大的傳輸帶系統, 連通全世界各海洋的不同水域 (彩頁圖B)。

溫鹽環流頗為類似大氣中的「哈得萊環流」(Hadley Circulation): 後者的主要形態是, 赤道附近的空氣由於強烈陽光照射和降雨所釋放的能量而變熱, 從而膨脹和上升, 到了南緯或北緯30度附近的少雲亞熱帶地區, 則由於輻射冷卻而收縮和沉降。這些垂直方向的氣流由接近地表的水平「赤道向」氣流以及在高空

(在大約海拔十二公里高處)的「極向」氣流相連通。另一方面，哈得萊環流是由低、中層大氣推動，溫鹽環流則主要由海洋表層推動，其產生條件要求更高，亦更容易遭受干擾。

丙 溫鹽環流狀態轉化的觸發

研究溫鹽環流的各種不同模式顯示，這個洋流系統最少有兩種穩定狀態，其中一種是目前所出現的，即是環流非常強勁和向極地方向傳輸大量熱能，從而帶來和暖氣候的狀態；另一種則是環流非常微弱，甚至接近於停止的狀態。數值模擬實驗顯示，這強狀態和弱狀態之間是可能出現相互轉化的，轉化可能由內部的紊亂過程所觸發，也就是在沒有外在條件改變的情況下出現。另外的模擬實驗則顯示，轉化亦可能是由特定的外在因素所觸發，而最可能的有效觸發機制，看來就是在大西洋北部突然出現強大的淡水入注流。這入注流會降低北大西洋表層海水的鹽度和密度，從而增加其浮力，減低其沉降運動，溫鹽環流因而會迅速減慢，由是導致它從前述的強狀態轉化到弱狀態，在其中極向的熱能輸送帶實際上停頓下來，西歐因而出現嚴寒。

問題是，這個強弱狀態之間的轉化機制，是否就的確是YD寒冷期在極短期間突然出現，後來又突然結束的關鍵呢？假如真是這樣，那麼觸發機制是否也就是強大的淡水入注？令人驚異的是，我們的確有相當清晰的地質證據來證明這一點；而且，強大淡水流的來源也同樣可以追尋出來。

首先，從海洋沉澱物的同位素分析記錄可以證實，在與YD事件大致相同的時期，即大約在13,000-11,000年前，溫鹽環流幾乎完全停止運行；而化石記錄則顯示，同一時期的歐洲處在近似冰川期的狀況之中。實際上，所謂「新仙女木」中的「仙女木」(Dryas)是一種草本植物，通常只生長於嚴寒的北極地區；然而，在YD時期歐洲卻出現了它的花粉，表明當時的氣候有如極地。

其次，我們又發現，YD事件與羅倫太德冰原(Laurentide ice sheet)的融化密切相關。在上一個冰川期，羅倫太德冰原覆蓋了北美洲的大部分^⑥。在大約兩萬年前寒冷時期結束，地球逐漸轉暖(圖3A)，羅倫太德冰原南端因而迅速融化，逐漸向北退縮。融化水主要沿密西西比(Mississippi)流域進入墨西哥灣，其中部分則在目前加拿大曼尼托巴(Manitoba)南部低窪處聚集成「阿格西湖」(Lake Agassiz，這名字是紀念十九世紀首創冰川期概念的著名地質學家阿格西[Louis Agassiz])。這個古代湖泊主要是由冰壩和其他地形圍成的。但是，隨着融化加劇，新的排泄渠道突然出現，使湖水朝經過聖羅倫斯(St. Lawrence)河谷東流入北大西洋。事實上，根據各種古氣候學證據，羅倫太德冰原融化後，其排水改道主要發生於12,000年前，也就是和YD事件的發生同步，這就為溫鹽環流的自強轉弱以及格陵蘭和西歐的突然降溫提供了可信的觸發機制；同時，也有證據表明，融解水在大約11,000年前重新納入密西西比河流域，由是切斷了北大西

洋的淡水入注，溫鹽環流因而得以復蘇，全球氣候也得以恢復長程轉暖的趨勢，直到今天。

丁 新仙女木事件會重臨嗎？

所以，我們有理由相信，北大西洋的淡水入注是導致氣候突然變遷的關鍵因素。這很重要，因為除了像阿格西湖那樣的淡水源以外，還有其他過程是可能改變北大西洋海水密度和溫鹽環流強度的。大洋表層的鹽度取決於降雨、河流、冰川注入等淡水輸入項和蒸發輸出項這兩者之間的平衡。原則上，任何對這平衡有重大衝擊的變化，都可能影響溫鹽環流和北大西洋乃至全球氣候。

例如，大氣可能受到溫室效應影響而增溫，這會加強水氣循環，也就是增加了熱帶地區的水蒸發，並導致非熱帶地區如北大西洋的降水量升高。我們知道ENSO對北大西洋地區的氣候(包括降雨量)有一定影響，溫室效應對於諸如ENSO之類的近乎全球性現象發生頻率和強度的影響，也可能間接引起降水量增加。更重要的是，溫室效應極可能加速北大西洋附近冰川、冰原和海洋冰的融化。有證據顯示，北冰洋的海洋冰體積在最近幾十年內已經大大縮小了。此外，海水密度不僅取決於鹽度，也取決於溫度——冷水比熱水密度更大：如果溫室效應導致海面暖化，那麼海水密度也將減低。所以，以上所有這些溫室效應對北大西洋海水的直接和間接影響，都具有增加其表層海水浮力，和導致溫鹽環流向弱狀態轉化的作用。弔詭的是，上述所有相關論證都指向一個多少令人吃驚的，與直覺相反的結論：溫室氣體所引起的「暖化」可能最終導致某些區域(如北大西洋)轉向嚴寒狀態。

不過，當溫室效應加劇時，也並不是所有的氣候變化都會導致北大西洋海水的密度降低。例如，海水升溫可能會增加蒸發，從而提升了海水表層的鹽度和密度；海冰在轉暖融解時會令冰層下面的海水暴露和蒸發，而蒸發又會降低海水表層溫度從而提高其密度，等等。這些過程的效應與前段所述的正好相反，而氣候系統最後的淨額反應(net response)則將取決於這種相互抵消的機制對北大西洋海域淡水平衡的相對影響。將上述因素都計算進去之後，大部分模式都預測，在本世紀溫鹽環流會隨着全球變暖而減弱，但這種變化是否會在超越某個臨界值之後導致環流完全消失，則還不清楚。

所以，由於各種自然和人為因素的交互作用，未來氣候的確可能在短期內發生劇烈突變——也就是說，「新仙女木」事件的重臨並非無稽之談。但從以往的地質證據和我們對氣候系統的了解看來，這種波及全球的基本氣候變化其時間尺度最少有好幾年，更可能的是幾十年甚至幾個世紀。至於電影《明日之後》的那種聳人聽聞的悲慘情節——紐約在幾分鐘或者幾天內陷於嚴重冰封狀態，則是沒有科學根據的。

四 結 語

大自然的浩瀚波濤和萬里長風奇詭而又壯觀，它能令人驚訝、振奮，生出無限猜測、玄思和幻想，莊子《逍遙遊》開篇便以碩大無朋的鯤鵬來馳騁想像力，其為人千古激賞殆非無因，它觸及「海運」和「扶搖而上九萬里」然後「徙於南冥」，更不免讓我們想起洋流和大氣的密切關係，那尤其是難得的巧合。

當然，我們今日所追求的，已經非復猜測、想像或者觀賞的態度，而是切實、精確的證驗和了解。不過，令人驚訝的是：雖然科學理論和觀測、實驗、計算方法比之古代乃至牛頓的時代已經進步了不知多少，雖然我們已經掌握了與地球科學有關的所有基本物理定律，然而，如本文所經常提到的那樣，我們對於大氣和洋流現象的實際知識還是很有限，而且還是不那麼確定的。

所以，在以上論述中，我們反覆強調：觀測數據、對相關過程的理解，以及建立模式這三者，在氣候研究中有同樣重要的作用。事實上，無論運用古氣候觀測重構氣候歷史例如新仙女木事件，或者解釋目前正在發生的現象例如變異的ENSO，或者預測未來氣候的變化例如溫室氣體的效應等等，都仍然是非常艱巨的任務。古氣象學家曾經將歷史氣候研究比喻為企圖單憑一部破舊留聲機錄取一件小玩具在暗室裏發出的沙啞聲音，從而猜測這玩具的各種特性^⑩。對於溫室氣體作用和ENSO的變化我們無疑有豐富和詳細得多的數據，但是仍然完全沒有辦法從最可靠的基本物理定律來直接計算或者推斷所觀測到的大氣現象。

人類目前已經發展出建立在物理學基礎之上，但仍然是高度描述性 (descriptive) 和現象性 (phenomenological) 的許多地球學學科，包括大氣物理學、海洋學、氣象學、冰河學、生態學、地球化學等等。把這些個別領域的專門知識加以溝通和整合，並且充分應用不斷提高的電腦功能，以使得描述各種地球現象的模式更為細緻、精確、可靠，乃至接近於完整的理論，是氣象學家和其他地球物理學家的共同任務和目標。

那麼，到底為甚麼極其精確、可靠和完整的基本物理定律卻無法精確、可靠和完整地解釋大氣和其他地球現象，而還得求助於探索性和現象性的「中層理論」以及各種模式呢？在從前，這總被認為只不過是由於人類的數學和計算能力還不夠高所致，但自從1960年代混沌 (chaos) 現象發現以來，我們才開始逐漸明白問題並非這樣簡單：在精確的基本理論和複雜系統 (諸如生態系統、大氣系統或者地球系統) 之間可能有巨大而不一定能夠逾越的障礙，使得複雜現象 (例如 ENSO 或者地球溫度的急劇變化) 的精確了解和長期預測成為極其困難，甚至實際上不可能。具體來說，這是因為複雜系統是高度非線性而且具有可以說是無限廣泛的牽連，所以系統中哪怕是最細微的事件或者不確定性，都足以造成無從估量的重要後果 (巨大隕石對生物滅絕和氣候的影響是最好的例子) ——而人類的觀測能力和計算能力總是有限度的。

可是，我們也不需要因此而悲觀，因為從許多數學上的模擬計算可以知道，即使在複雜系統的混沌區域中，也仍然會有大量容許簡單預測的非混沌區

存在；況且，電子計算機的不斷飛躍發展也將容許我們通過大量的數值計算來部分克服在混沌區域無法解析性地 (analytically) 做預測的困難。實際上，這正就是氣象學和前述那許多地球科學分支之所以能夠蓬勃發展的理由：觀測是現象的描述，對相關過程的理解是基本理論的應用和延伸，而構造模式則是以上兩者的結合，也是穿越和克服混沌所造成障礙的策略。這策略的效用和成功，是從化學、生物學以至地球科學的不斷進步都可以得到證明的。它也充分顯明：從極少數基本原理來了解大自然的觀念，也就是所謂「化約主義」(Reductionism) 的觀念雖然近來經常受到質疑、挑戰，但它基本上還是正確和有效用的——只不過基本理論和自然現象之間的關係，遠比我們原先所想的複雜得多而已。

劉擎 譯

註釋

① 見劉雅章：〈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；〈厄爾尼諾：太平洋之子〉，1998年4月號。

②④⑤ Christopher L. Sabin et al., "The Oceanic Sink for Anthropogenic CO₂", *Science*, 305 (16 July 2004): 367-71.

③ Taro Takahashi, "The Fate of Industrial Carbon Dioxide", *Science*, 305 (16 July 2004): 352-53.

⑥ *The New York Times*, 2 August 1983; 及美國國家海洋和大氣局(U.S. National Oceanic and Atmospheric Administration) 估計。

⑦ Kevin E. Trenberth and Timothy J. Hoar, "The 1990-1995 El Nino-Southern Oscillation Event: Longest on Record", *Geophysical Research Letters* 23, no. 1 (1 January 1996): 57-60.

⑧ T. R. Knutson and S. Manabe, *J. Climate*, 8 (1995): 2181-99; G. A. Meehl and W. M. Washington, *Nature*, 382 (1996): 56-60; T. R. Knutson et al., *J. Climate*, 10 (1997): 138-61; M. A. Cane et al., *Science*, 275 (1997): 957-60; T. R. Knutson and S. Manabe, *J. Climate*, 11 (1998): 2273-96; A. Timmermann et al., *Nature*, 398 (1999): 694-96; M. Collins, *J. Climate*, 13 (2000): 1299-312; M. Collins, *Geophysical Research Letters*, 27 (2000): 3509-12

⑨⑩ U.S. National Research Council, *Abrupt Climate Change: Inevitable Surprises* (Washington, D.C.: National Academy Press, 2002).

⑩ D. L. Hartmann, *Global Physical Climatology* (San Diego: Academic Press, 1994), 223-24.

劉雅章 美國國家海洋和大氣局地球物理流體動力實驗室高級研究員、氣候觀察與診斷研究組組長，並擔任普林斯頓大學大氣與海洋學教授。曾以「楊振寧訪問學人」身份訪問香港中文大學。

陳方正 香港中文大學中國文化研究所名譽高級研究員，前所長。